

REDAKCJA NAUKOWA
JAROSŁAW TĘPIŃSKI
BARTŁOMIEJ POŁEĆ



BADANIA NA RZECZ POPRAWY BEZPIECZEŃSTWA

w zakładach przemysłowych
stwarzających zagrożenie poza swoim terenem

BADANIA NA RZECZ POPRAWY BEZPIECZEŃSTWA

w zakładach przemysłowych
stwarzających zagrożenie poza swoim terenem

BADANIA NA RZECZ POPRAWY BEZPIECZEŃSTWA

w zakładach przemysłowych
stwarzających zagrożenie poza swoim terenem

Praca pod redakcją

dr. inż. Jarosława Tępińskiego
mgr. Bartłomieja Połcia

Publikacja opracowana w ramach projektu nr DOB-BIO7/09/03/2015
pt. „Program do oceny ryzyka wystąpienia awarii w obiektach przemysłowych stwarzających
zagrożenie poza swoim terenem” finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Projekt realizowany przez konsorcjum w składzie:
Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwpowodziowej
im. Józefa Tuliszkowskiego – Państwowy Instytut Badawczy (lider),
Narodowe Centrum Badań Jądrowych,
Politechnika Warszawska,
Bera Systems Sp. z o.o.



Wydawnictwo CNBOP-PIB

Józefów 2020

Recenzja naukowa:

prof. dr hab. inż. Joanna Karcz
prof. dr hab. inż. Bernard Wiśniewski

Redakcja naukowa:

dr inż. Jarosław Tępiński
mgr Bartłomiej Połec

Redakcja językowa i korekta:

dr Klaudia Pujer

Przygotowanie do druku:

Aleksandra Grzęda
Elżbieta Muszyńska-Poleć
Katarzyna Szulejewska

Skład i projekt okładki:

www.drukujzsensem.pl

Grafika na okładce:

Pixabay

Publikacja jest dostępna na licencji Creative Commons
Uznanie autorstwa-Na tych samych warunkach 4.0 Międzynarodowe (CC BY-SA 4.0)

Pewne prawa zastrzeżone.

Pełna treść licencji jest dostępna na stronie
creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode.pl

Wydawca:

Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwpowodziowej
im. Józefa Tuliszkowskiego
Państwowy Instytut Badawczy
05-420 Józefów k. Otwocka, ul. Nadwiślańska 213
www.cnbop.pl

DOI: 10.17381/2020.1
ISBN 978-83-948534-7-1

Druk i oprawa:

www.drukujzsensem.pl

Nakład: 150 egz.

Spis treści

WPROWADZENIE	7
<i>Jaroslav Tępiński, Bartłomiej Poleć</i>	
I. POMIARY PROMIENIOWANIA CIEPLNEGO I TEMPERATURY POŻARÓW ROZLEWISK CIECZY ORAZ POŻARÓW STRUMIENIOWYCH – ZAŁOŻENIA KONCEPCYJNE DO BADAŃ W DUŻEJ SKALI	13
<i>Wojciech Klapsa, Piotr Lesiak, Bartłomiej Poleć, Jaroslav Tępiński</i>	
II. BADANIA POŻARÓW POWIERZCHNIOWYCH I STRUMIENIOWYCH W DUŻEJ SKALI	45
<i>Jaroslav Tępiński, Bartłomiej Poleć, Wojciech Klapsa, Piotr Lesiak</i>	
III. MODELOWANIE MATEMATYCZNE POŻARÓW POWIERZCHNIOWYCH METODĄ OBLICZENIOWEJ MECHANIKI PŁYNÓW	69
<i>Robert Cherbański, Leszek Rudniak, Piotr Machniewski, Eugeniusz Molga</i>	
IV. WYKORZYSTANIE OBLICZENIOWEJ MECHANIKI PŁYNÓW DO MODELOWANIA MATEMATYCZNEGO POŻARÓW STRUMIENIOWYCH NA POTRZEBY PROJEKTU EVARIS	95
<i>Michał Levak, Eugeniusz Molga</i>	
V. METODYKA IDENTYFIKACJI MOŻLIWOŚCI POWSTANIA EFEKTU DOMINO	121
<i>Mieczysław Borysiewicz, Ewa Kozvalik-Pilarska, Grzegorz Siess, Henryk Wójcichołowicz</i>	
VI. OCENA ZAGROŻEŃ ŚRODOWISKOWYCH WYWOŁYWANYCH PRZEZ POWAŻNE AWARIE PRZEMYSŁOWE	147
<i>Mieczysław Borysiewicz, Ewa Kozvalik-Pilarska, Grzegorz Siess, Henryk Wójcichołowicz</i>	
VII. RAT-if – PROGRAM DO OCENY RYZYKA WYSTĄPIENIA AWARII W OBIEKTACH PRZEMYSŁOWYCH STWARZAJĄCYCH ZAGROŻENIE POZA SWOIM TERENEM	165
<i>Bogusław Bierniak, Angelika Bojar, Konrad Malik, Piotr Salkowski</i>	

WPROWADZENIE

Jarosław Tępiński, Bartłomiej Połec

*Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwpożarowej
im. Józefa Tuliszkowskiego – Państwowy Instytut Badawczy*

Wprowadzenie

Każdy rodzaj podejmowanej przez człowieka działalności z wykorzystaniem substancji niebezpiecznych związany jest z ryzykiem wystąpienia niepożądanych zdarzeń zagrażających zdrowiu i życiu ludzi oraz otoczeniu, w pobliżu którego jest ona realizowana. Poważne awarie przemysłowe zwróciły uwagę środowisk naukowych dopiero w drugiej połowie XX wieku. Wykazano, że ich skutki mogą obejmować znaczne obszary poza terenem zakładu, na którym miały miejsce. Na początku XXI wieku, na zlecenie Komisji Unii Europejskiej, w ramach prac koordynowanych przez Major Accident Hazards Bureau (MAHAB), w Joint Research Centre przeprowadzono analizę poważnych awarii, które miały miejsce w wybranych państwach europejskich. Analizie poddano informacje o 550 awariach, które wydarzyły się w drugiej połowie ubiegłego wieku. Materiał badawczy pozyskano z baz danych ARIA (Francja), FACTS (Holandia), MHIDAS (Wielka Brytania) oraz MARS i CDCIR (MAHB – UE). W toku badań 406 zdarzeń zakwalifikowano jako awarie związane z powstaniem oraz uwolnieniem do otoczenia substancji niebezpiecznych. W sumie, w analizowanych zdarzeniach awaryjnych brało udział ponad 350 różnych substancji chemicznych. Na podstawie danych, zawartych w wymienionych bazach, określono udział poszczególnych skutków poważnych awarii przemysłowych w analizowanych zdarzeniach. Pożary stanowiły ok. 45% wszystkich zdarzeń, uwolnienia substancji toksycznych ok. 33%, a wybuchy ok. 22%. Pokazuje to, jak istotne jest zrozumienie tych zdarzeń oraz zjawisk im towarzyszących.

Niniejsza publikacja ma na celu przybliżyć wyniki badań prowadzonych na rzecz poprawy bezpieczeństwa w zakładach przemysłowych, realizowanych w ramach projektu nr DOB-BIO7/09/03/2015 finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju pt. „Program do oceny ryzyka wystąpienia awarii w obiektach przemysłowych stwarzających zagrożenie poza swoim terenem”. Projekt – realizowany pod akronimem EVARIS – ma na celu wyjście naprzeciw zapotrzebowaniu organów administracji publicznej oraz służb właściwych do rozpoznawania zagrożeń na narzędzie, pozwalające na: skuteczną identyfikację zakładów stwarzających ryzyko poza swoim terenem, wykonywanie operatów bezpiecznych odległości, a także wprowadzenie zasad zarządzania ryzykiem już na etapie tworzenia założeń do aktów planistycznych. Głównym efektem realizacji

projektu EVARIS jest narzędzie informatyczne RAT-if (ang. *Risk Assessment Toolbox at Hazardous Industrial Facilities Posing Threat Outside their Area*) służące do całościowej oceny ryzyka wystąpienia awarii w obiektach przemysłowych stwarzających zagrożenie poza swoim terenem. W siedmiu rozdziałach współautorskich przedstawiono problematykę związaną z: prowadzonymi badaniami eksperymentalnymi nad oddziaływaniem pożarów powierzchniowych oraz strumieniowych w dużej skali, analizą modelowania matematycznego tychże zjawisk, metodami identyfikacji możliwości powstania efektu domino, oceną zagrożeń środowiskowych wywołanych przez awarie przemysłowe oraz programem RAT-if wspomagającym wykonywanie zaawansowanych analiz ryzyka pochodzącego od instalacji przemysłowych.

W rozdziale I, który stanowi metodyczne wprowadzenie do opisu badań zawartych w rozdziale kolejnym, przedstawiono metody i narzędzia służące do pomiarów promieniowania cieplnego, temperatury pożarów i wysokości płomienia. W rozdziale tym została omówiona koncepcja doboru aparatury pomiarowej do badań pożarowych, a także podstawowe problemy prowadzenia badań eksperymentalnych w dużej skali. W rozdziale II przedstawione zostały wyniki prowadzonych badań pożarów powierzchniowych i strumieniowych w dużej skali, które służyły m.in. do walidacji oprogramowania RAT-if wykorzystywanego do obliczeń numerycznych potencjalnych zagrożeń, ale mogą także być wykorzystane do bezpośredniego projektowania odpowiednich zabezpieczeń. W rozdziałach III i IV zaprezentowane zostały wyniki przeprowadzonych symulacji komputerowych modelem CFD zjawisk odpowiednio pożarów powierzchniowych oraz strumieniowych, które posłużyły do walidacji tworzonego w ramach projektu EVARIS oprogramowania RAT-if. W kolejnym rozdziale omówiono metodykę identyfikacji wystąpienia efektów domino, która może znaleźć swoje zastosowanie również w analizach ryzyka, wykonywanych na potrzeby raportów o bezpieczeństwie. Opisaną metodykę identyfikacji wystąpienia efektu domino została zaimplementowana do narzędzia informatycznego tworzonego w ramach realizacji projektu EVARIS. W rozdziale VI dokonano przeglądu i oceny skutków wywoływanych przez awarie przemysłowe, które wpływają na środowisko naturalne. Przedstawione zostały potencjalne konsekwencje generowane przez różnego typu zdarzenia z substancjami niebezpiecznymi, a także stosowane aspekty oceny ryzyka środowiskowego oraz możliwe do wdrożenia kryteria akceptacji tego rodzaju ryzyka. W ostatnim rozdziale niniejszej publikacji zaprezentowano oprogramowanie RAT-if, przeznaczone do wspomagania oceny ryzyka wystąpienia awarii w obiektach przemysłowych stwarzających zagrożenie poza swoim terenem. Narzędzie informatyczne stanowi efekt końcowy realizacji projektu EVARIS. Oprogramowanie RAT-if umożliwia: identyfikację zagrożeń wynikających z użytkowania substancji niebezpiecznych w obiektach przemysłowych, obliczanie zasięgów skutków awarii oraz wyznaczanie bezpiecznych odległości zakładów przemysłowych w stosunku do otaczających obiektów i terenów. W programie

zostały zaimplementowane metodyki oraz modele numeryczne zaprezentowane m.in. w rozdziałach niniejszej monografii, które poddano szeroko zakrojonej walidacji w ramach prowadzonych badań, symulacji komputerowych oraz analiz porównawczych.

Omówione w niniejszej publikacji zagadnienia kierowane są w szczególności do osób zajmujących się prezentowaną problematyką zawodowo, czyli pracowników organów administracji publicznej, jednostek organizacyjnych Państwowej Straży Pożarnej i innych służb ratowniczych, instytucji zaangażowanych bezpośrednio w proces tworzenia aktów planistycznych, identyfikację zakładów stwarzających ryzyko poza swoim terenem, zajmujących się zarządzaniem ryzykiem już na etapie tworzenia założeń do aktów planistycznych, studentów oraz innych osób zainteresowanych procesem oceny ryzyka w zakładach przemysłowych. Wyrażamy nadzieję, iż zarówno niniejsza publikacja, jak i uzyskane wyniki w projekcie EVARIS wywrą pozytywny wpływ na działania podejmowane w celu podniesienia poziomu bezpieczeństwa zakładów przemysłowych oraz powstanie kompleksowej w skali całego kraju metodyki oceny ryzyka wystąpienia awarii związanych z eksploatacją substancji niebezpiecznych.

ROZDZIAŁ I.

**POMIARY PROMIENIOWANIA
CIEPLNEGO I TEMPERATURY
POŻARÓW ROZLEWISK CIECZY
ORAZ POŻARÓW STRUMIENIOWYCH
– ZAŁOŻENIA KONCEPCYJNE
DO BADAŃ W DUŻEJ SKALI**

Wojciech Klapsa, Piotr Lesiak,
Bartłomiej Połec, Jarosław Tępiński

*Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwpożarowej
im. Józefa Tuliszkowskiego – Państwowy Instytut Badawczy*

1. Wprowadzenie

Zagrożeniami, jakie niesie ze sobą pożar, są przede wszystkim wysoka temperatura i związane z nią promieniowanie cieplne. W strefie spalania gazów, cieczy i ciał stałych średnia temperatura może sięgać powyżej 1000°C. Oddziaływanie ciepła na organizm człowieka może powodować zaburzenia temperatury ciała. Jej podwyższenie do 39°C może skutkować utratą przytomności. Podobny skutek może mieć miejsce podczas pracy w wysokiej temperaturze przy napromieniowaniu nieochronionej głowy¹.

Każdy pożar jest związany z powstawaniem promieniowania cieplnego. Jego źródłem są płomienie i żar, które stanowią bezpośrednie niebezpieczeństwo dla strażaków. Ratownicy są narażeni na kontakt z rozgrzаныmi gazami, unoszonymi przez wiry powietrza iskrami lub płonącymi elementami konstrukcji. Promieniowanie cieplne może wywoływać u człowieka ból, którego granicę wyznacza strefa oddziaływania cieplnego gazu o temperaturze 60–70°C. Wartość gęstości strumienia promieniowania, który powoduje ból fizyczny u ludzi wynosi około 2,5 kW/m². Skutki promieniowania cieplnego na organizm człowieka scharakteryzowano poniżej²:

- 1 kW/m² – promieniowanie słoneczne, nie powoduje dyskomfortu w długim czasie ekspozycji,
- 1,6 kW/m² – mało komfortowe warunki,
- 2,1 kW/m² – minimalna wartość powodująca ból po 50 s,
- 4,7 kW/m² – powoduje ból po 15–20 s, oparzenia po 30 s,
- 9,5 kW/m² – ból po 8 s; oparzenia II stopnia po 20 s,
- 12,5 kW/m² – 1% zgonów w ciągu 60 s (najmniejsza dawka promieniowania cieplnego powodująca zapłon drewna, uszkodzenia ciała),
- 37,5 kW/m² – 1% zgonów w ciągu 10 s (uszkodzenie urządzeń technicznych)³.

Transport ciepła zachodzi w wyniku trzech mechanizmów⁴:

1. Przewodzenia – procesu wymiany ciepła między ciałami o różnej temperaturze pozostającymi ze sobą w bezpośrednim kontakcie. Polega on na prze-

¹ T. Sawicki, *Czynniki zagrażające bezpieczeństwu strażaków w warunkach pożaru*, „Bezpieczeństwo Pracy” 2004, 7–8, s. 35–38.

² jw.

³ S.M. Hockey, P.J. Rew, *Review of Human Response to Thermal Radiation*, Health and Safety Executive, Epsom 1996, 87.

⁴ J. Kubik, *Podstawy fizyki budowlanej*. Podręcznik akademicki, Politechnika Opolska, Opole 2008, s. 7.

kazywaniu energii kinetycznej bezładnego ruchu cząsteczek w wyniku ich zderzeń. Proces prowadzi do wyrównania temperatury między ciałami. Jest to mechanizm występujący w ciałach stałych i cieczech.

2. Konwekcji – unoszenia ciepła – występującego wtedy, gdy poszczególne makroskopowe cząstki ośrodka, w których odbywa się ruch ciepła, zmieniają swoje położenie. Rozróżnia się przy tym dwa rodzaje konwekcji: swobodną i wymuszoną. Przy konwekcji swobodnej ruch ośrodka jest wynikiem różnic gęstości spowodowanych wzrostem objętości przy ogrzewaniu. Przy konwekcji wymuszonej ruch ośrodka spowodowany jest różnicą ciśnienia ogólnego (w przypadku powietrza może ona być wynikiem działania wiatru lub wentylatorów). Konwekcja zachodzi głównie w cieczech i gazach.
3. Promieniowania cieplnego – radiacji – jest to mechanizm przenoszenia ciepła, który odbywa się na odległość i zachodzi za pośrednictwem fal elektromagnetycznych, przy czym następuje tu dwukrotna zmiana postaci energii, tj. cieplnej na elektromagnetyczną na powierzchni ciała wymieniającego ciepło i elektromagnetycznej na cieplną na powierzchni ciała pochłaniającego ciepło.

Każdy pożar – niezależnie od tego, w jaki sposób został zainicjowany proces spalania – posiada swój początek zarówno w czasie, jak i w konkretnej przestrzeni. Stąd też miejsce jego powstania określa się mianem ogniska pożaru. Miejszem tym jest zawsze ściśle określony punkt w pomieszczeniu, urządzeniu, aparaturze, instalacji itd. Przestrzeń, w której powstał pożar oraz towarzyszące mu zjawiska mające wpływ na sytuację pożarową, można umownie podzielić na cztery strefy⁵:

1. spalania,
2. konwekcyjną,
3. zadymienia,
4. oddziaływania cieplnego.

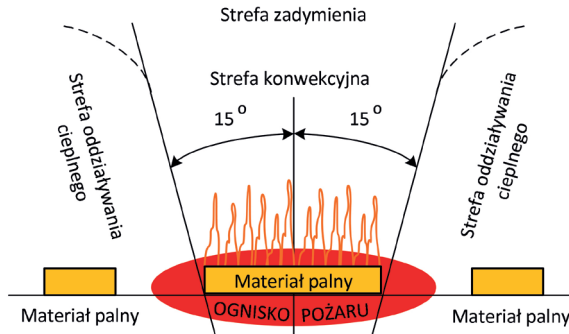
Strefa oddziaływania cieplnego obejmuje część przestrzeni wokół strefy spalania, w której wydzielające się ciepło może doprowadzić do zmian w sytuacji pożaru i zagrozić ludziom. Za graniczną temperaturę strefy oddziaływania cieplnego przyjmuje się 60°C. Rozmiary tej strefy zależą w szczególności od⁶:

1. rodzaju pożaru (zewnątrzny lub wewnętrzny),
2. wielkości strefy spalania,
3. temperatury spalania,
4. sposobów rozchodzenia się ciepła.

Na ryc. 1 przedstawiono schematyczny podział na wyżej wymienione strefy.

⁵ M. Pofit-Szczepeńska, *Wybrane zagadnienia z chemii ogólnej, fizykochemii spalania i rozwoju pożarów*, SA PSP w Krakowie, Kraków 1994.

⁶ jw.



Ryc. 1. Strefy spalania występujące w trakcie pożaru

Źródło: opracowanie własne.

Poniżej opisano podstawowe parametry związane z przenoszeniem ciepła:

1. Ciepło – energia powstająca w wyniku spalania materiałów w warunkach pożarowych, wyrażona w dżulach [J].
2. Strumień ciepła – prędkość przepływu ciepła, będąca stosunkiem danej ilości ciepła do jednostki czasu [J/s] lub [W]. Strumień ciepła jest jednocześnie formą transportu ciepła w drodze promieniowania. W literaturze spotyka się również pojęcia szybkość wydzielania się ciepła lub „moc pożaru”.
3. Gęstość strumienia ciepła – strumień ciepła padający na daną powierzchnię. Inaczej nazywany gęstością promieniowania ciepłego [W/m²].

Podczas analizy zagadnień wymiany ciepła najczęściej stosowane jest prawo adytywności, które zakłada niezależność wspomnianych wcześniej rodzajów wymiany ciepła. Oznacza to, że obliczone wartości energii cieplnej związane z przewodzeniem, unoszeniem i promieniowaniem sumuje się niezależnie. Jak wskazano wyżej, podczas pożaru występują wszystkie trzy typy wymiany ciepła, jednak w poszczególnych fazach rozwoju pożaru dominuje zazwyczaj jeden rodzaj. Przykładowo konwekcja odgrywa szczególną rolę na początku pożaru, kiedy poziom promieniowania ciepłego nie jest wysoki. Z kolei promieniowanie stanowi podstawową formę rozprzestrzeniania się ciepła, jeżeli średnica pożaru przekracza 0,3 m. Mechanizm ten ma decydujący wpływ na rozwój pożaru w pomieszczeniach. Wpływ promieniowania ciepłego płomieni lub dowolnego ogrzanego obiektu na pobliskie powierzchnie może być oceniony tylko przy pomocy dokładnej analizy procesów wymiany ciepła. Jest ona niezbędna do oceny czasu ogrzewania materiałów palnych, do momentu, w którym następuje ich zapalenie lub uszkodzenie.

Poniżej zdefiniowano podstawowe pojęcia stosowane przy opisie zagadnień związanych z promieniowaniem ciepłym.

1. Pole temperatur – zbiór wartości temperatur we wszystkich punktach rozpatrywanej przestrzeni w danej chwili⁷.

⁷ S. Wiśniewski, T.S. Wiśniewski, *Wymiana ciepła*, WNT, Warszawa 2000, s. 17.

2. Ustalona wymiana ciepła – pole temperatur nie zmienia się w czasie.
3. Nieustalona wymiana ciepła – pole temperatur zmienia się w czasie, np. podczas pożarów, ogrzewania lub chłodzenia stalowych elementów (hartowanie). W większości procesów po pewnym okresie nieustalonej wymiany ciepła układ dąży do stanu równowagi cieplnej, który charakteryzuje się stałym rozkładem temperatur $\frac{dT}{dt} = 0$.
4. Powierzchnia izotermiczna – zbiór punktów o jednakowych temperaturach.
5. Strumień ciepła \dot{Q} (natężenie przepływu ciepła lub moc ciepła):

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} \quad [\text{J/s}] \quad (1)$$

gdzie:

Q – ciepło [J],

t – czas [s].

Strumień ciepła dla stanu ustalonego (stosunek ciepła Q do czasu t trwania wymiany tej ilości ciepła):

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t} \quad [\text{J/s}] \quad (2)$$

6. Gęstość strumienia ciepła q :

$$q = \frac{d^2Q}{dA dt} \quad [\text{W/m}^2] \quad (3)$$

gdzie:

A – pole powierzchni [m^2].

Gęstość strumienia ciepła dla stanu ustalonego (stosunek strumienia ciepła \dot{Q} do pola A powierzchni izotermicznej, przez którą przepływa ten strumień):

$$\text{a) powierzchniowa} \quad q_A = \dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = \frac{Q}{tA} \quad [\text{W/m}^2] \quad (4)$$

$$\text{b) objętościowa} \quad q_V = \frac{\dot{Q}}{V} \quad [\text{W/m}^3] \quad (5)$$

gdzie:

V – objętość [m^3]

$$\text{c) liniowa} \quad q_L = \frac{\dot{Q}}{L} \quad [\text{W/m}] \quad (6)$$

gdzie:

L – długość [m].

Gęstość strumienia ciepła jest wektorem skierowanym prostopadle do powierzchni izotermicznej w kierunku spadku temperatury.

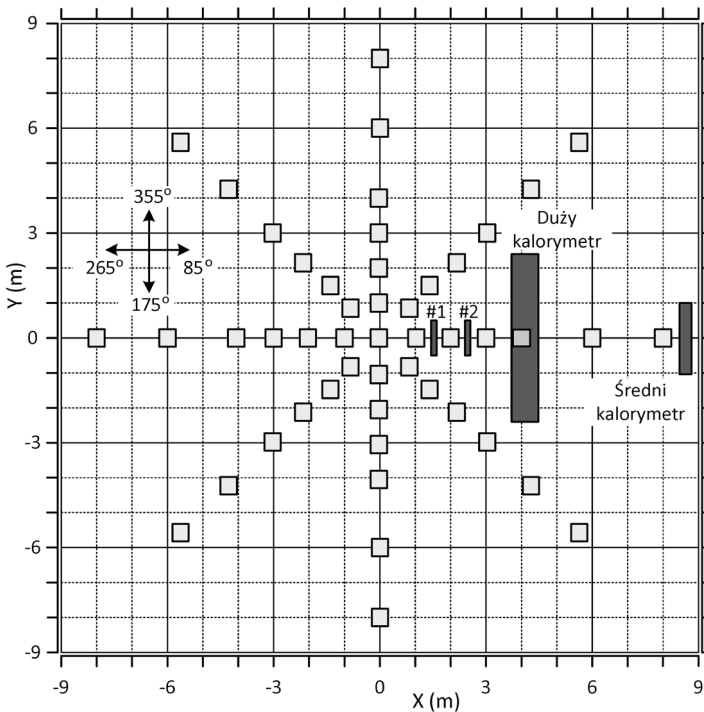
2. Przykłady badań eksperymentalnych

Na przestrzeni wielu lat prowadzone były różne badania eksperymentalne nad problematyką pożarów powierzchniowych cieczy palnych. Wykonywano je głównie w celu poszukiwania lub weryfikacji modeli matematycznych służących do szacowania skutków awarii. W literaturze znaleźć można wiele modeli opisujących pożary powierzchniowe. Eksperymenty były wykonywane w różnej skali doświadczalnej – od laboratoryjnej do dużej (na poligonach). Poznanie zjawiska spalania się cieczy w rozlewiskach pozwoliło na opracowanie skutecznych metod szacowania jego skutków, które to z kolei umożliwiają prawidłową ocenę ryzyka awarii związanych z uwolnieniem się cieczy palnych do otoczenia. Jest to najczęściej występujący rodzaj awarii zarówno w instalacjach technologicznych, jak i magazynowaniu czy transporcie substancji niebezpiecznych. Przy niekorzystnym rozwoju zdarzeń może dojść do zapłonu i wystąpienia znacznych szkód, a nawet ofiar wśród ludzi. Poniżej zostały przywołane dwa testy, które są zbliżone w swoich założeniach pomiarowych do eksperymentów projektowanych przez CNBOP-PIB w ramach realizacji projektu EVARIS finansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.

Sposób prowadzenia jednego z takich eksperymentów w dużej skali został opisany przez Thomasa Blanchata i Victora Figueroa w 2008 roku⁸. Eksperyment był prowadzony w ramach programu badawczego przez Sandia National Laboratories (SNL) i Defense Threat Reduction Agency (DTRA). Miał na celu walidację narzędzi numerycznych służących do oceny zagrożenia podczas pożarów rozlewisk cieczy palnych. Zaplanowane zostały cztery eksperymenty prowadzone w dwóch różnych warunkach wietrznych. Podczas testów dokonywano pomiarów szybkości spalania cieczy w rozlewisku, uwalnianego strumienia ciepła do otoczenia przy dobrze scharakteryzowanych warunkach brzegowych oraz wysokości płomienia, przy użyciu zapisu obrazu wideo. Badania przeprowadzono w tacy o średnicy 7,92 m i głębokości 92 cm wykonanej ze stali o grubości ścianki 1,3 cm, zagłębionej w ziemi na równi z poziomem terenu. Do testów wykorzystano paliwo JP8. Wszystkie testy przeprowadzono przy użyciu około 8354 l paliwa wylanego na 76 cm wody, co dało warstwę cieczy ok. 15 cm. Wokół tacy zostały umieszczone cztery kalorymetry oraz 49 mierników strumienia ciepła Sandia (HFG) zlokalizowanych zarówno wewnątrz, jak i na zewnątrz ognia w celu pomiaru padającego strumienia ciepła. Duży kalorymetr został ustawiony po stronie zawietrznej tacy, a pozostałe ustawiono tak, aby przeważające kierunki wiania wiatru ulokowały się wzdłuż dłuższej osi dużego kalorymetru. Pomiaru siły wiatru i jego kierunku dokonywano na czterech wieżach zlokalizowanych w odległościach po 18 m od siebie, w odległości 38 m pod wiatr od środka tacy. Czujniki umieszczono na wysokościach 2 m, 5 m i 10 m.

⁸ T. Blanchat, V. Figueroa, *Large-Scale Open Pool Experimental Data and Analysis for Fire Model Validation and Development*, „Fire Safety Science” 2008, 9, s. 105–116, <https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.9-105>.

Do pomiaru rozkładu strumienia ciepła w pobliżu powierzchni paliwa i otaczającego terenu zastosowano półkuliste mierniki strumienia ciepła (HFG) zaprojektowane przez SNL. Czujnik składał się z cienkiej metalowej płytki (jedna strona zwrócona była w kierunku płomienia, a druga strona była izolowana), do której przymocowano termoparę. Tak skonstruowane mierniki, w sumie 49 szt., zostały rozmieszczone stroną pomiarową do góry na wysokości ok. 15 cm nad powierzchnią gruntu i 18 cm nad powierzchnią cieczy. Zastosowano również dwa małe kalorymetry, jeden średni oraz jeden duży – oba zaprojektowane przez Sandia. Wewnątrz kalorymetrów znajdowały się termopary przymocowane do ich wewnętrznej powierzchni, a środek był wypełniony izolatorem. Zewnętrzne powierzchnie pomalowane zostały czarną farbą o znanej emisyjności. Sposób rozmieszczenia czujników pomiarowych w badaniach realizowanych przez Sandia National Laboratories (SNL) i Defense Threat Reduction Agency (DTRA) przedstawiono na ryc. 2 (którą opracowano na podstawie badań T. Blanchata i V. Figueroa⁹).



Ryc. 2. Rozmieszczenie mierników strumienia ciepła i kalorymetrów podczas testów

Źródło: opracowanie własne na podstawie T. Blanchat, V. Figueroa, *Large-Scale Open Pool Experimental Data and Analysis for Fire Model Validation and Development*, „Fire Safety Science” 2008, 9, s. 105–116, <https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.9-105>.

⁹ jw.

Ubytek masy paliwa wskutek spalania określano za pomocą pomiaru ciśnienia chwilowego cieczy znajdującej się w zbiorniku (słupa cieczy) oraz temperatury cieczy, przy użyciu pionowo ustawionego grzebienia składającego się z 30 termopar w odstępach co 1,3 cm. W chwili rozpoczęcia testów 2 lub 3 termopary znajdowały się ponad powierzchnią cieczy. Rozmiary płomienia mierzono przy użyciu kamer rozstawionych wokół tacy, tak aby rejestrowały obszar 55 m ponad powierzchnią cieczy. Analizę wysokości płomienia wykonano na podstawie pomiarowego wyskalowania punktu odniesienia znajdującego się pomiędzy kamerą a tacą.

Akwizycja danych (DAQ) była oparta na komputerze PC przy użyciu 16-bitowego sprzętu do akwizycji danych National Instruments (NI). Dane z termopar i mierników strumienia ciepła były próbkowane jednocześnie dla wszystkich kanałów z szybkością co najmniej jednej próbki na sekundę.

W wyniku prowadzonych testów zebrane zostały dane na temat:

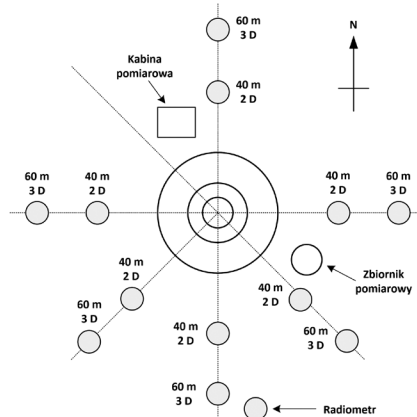
- występującego wiatru,
- strumienia ciepła nad powierzchnią cieczy oraz gruntu w pobliżu tacy,
- strumienia ciepła przekazywanego do obiektów (odczyty z kalorymetrów),
- temperatury cieczy i ciśnienia słupa cieczy.

Zgromadzone informacje posłużyły do wyznaczenia szybkości ubytku masy. Zarejestrowano również obraz w celu określenia charakterystyki płomienia. Wyniki eksperymentalne wykazały silną korelację między warunkami wietrznymi, wskaźnikiem utraty masy paliwa i przekazywanym strumieniem ciepła do rozlewiska oraz kalorymetrów.

Podobne badania eksperymentalne zostały opisane przez Chen Zhen i Wei Xiaolin w artykule pt. *Analysis for Combustion Properties of Crude Oil Pool Fire* opublikowanym w materiałach z międzynarodowego sympozjum „Safety Science and Technology”¹⁰. W swoim opracowaniu badacze skupili się na walidacji modeli wydzielania się ciepła od płonącego rozlewiska ropy naftowej w różnej skali. Przywołali wyniki już wcześniej wykonanych badań oraz opracowane przez innych badaczy (takich jak: Blinov i Khudyakov, Koseki czy Thomas) modele matematyczne. Opisany został eksperyment przeprowadzony w Tomakomai w 1998 roku przez JNOC (Japan National Oil Corporation), NRIFD (National Research Institute of Fire and Disaster) i UTokyo (The University of Tokyo). W testach zastosowane zostały rozlewiska o średnicach 5 m, 10 m i 20 m, a spalaniu poddawano arabską lekką ropę naftową. Mierzone były takie wartości, jak: szybkość spalania, wysokość płomienia, wewnętrzna temperatura ognia, skład produktów spalania i strumień ciepła. Szybkość spalania mierzono przy pomocy miarki ustawionej na dnie tacy, a do pomiaru strumienia ciepła użyto 12–16 radiometrów umieszczonych 1,2 m nad ziemią. Sposób rozmieszczenia radiometrów został zobrazowany na ryc. 3,

¹⁰ C. Zhen, W. Xiaolin, *Analysis for Combustion Properties of Crude Oil Pool Fire*, „Procedia Engineering” 2014, 84, s. 514–523.

którą opracowano na podstawie badań C. Zhena i W. Xiaolina¹¹. Stacja meteorologiczna do pomiaru warunków meteo znajdowała się 80 m na wschód od centrum tacy testowej. Dokonywano pomiarów m.in. temperatury otoczenia, wilgotności, prędkości i kierunku wiatru.



Ryc. 3. Rozkład mierników podczas wykonywanych testów

Źródło: opracowanie własne na podstawie C. Zhen, W. Xiaolin, *Analysis for Combustion Properties of Crude Oil Pool Fire*, „Procedia Engineering” 2014, 84, s. 514–523.

Mając do dyspozycji bazę wyników uzyskanych z prowadzonych testów, naukowcy dokonali również analizy teoretycznej. W jej wyniku otrzymali prawdopodobne wyliczenia na podstawie zastosowanych modeli dla szybkości spalania (model Babrauskasa) oraz wielkości płomienia (model Thomasa i Heskestada). Do obliczenia promieniowania cieplnego zastosowali dwa modele: model źródła punktowego oraz model Shokri-Beyler. Tak wyliczone wartości zestawili z eksperymentalnymi danymi, co ukazuje tabela 1.

Tabela 1. Dane uzyskane podczas eksperymentu (C. Zhen, W. Xiaolin) oraz wyliczenia teoretyczne

ŚREDNICA TACY	DANE EKSPERYMENTALNE				WYLICZENIA TEORETYCZNE		
	Warstwa paliwa [mm]	Czas spalania [min]	Szybkość spalania [kg/(m ² *s)]	Wysokość płomienia [m]	Szybkość spalania [kg/(m ² *s)]	Wysokość płomienia [m]	
						Thomas	Heskestad
D = 20 m	50	18,5	0,043	38	0,0466	32,2	38,7
D = 10 m	50	19,3	0,0364	18	0,037	15,9	19,8
D = 5 m	50	18,1	0,0365	9,1	0,0245	8,7	11,5

Źródło: C. Zhen, W. Xiaolin, *Analysis for Combustion Properties of Crude Oil Pool fire*, „Procedia Engineering” 2014, 84, s. 514–523.

¹¹ jw.

Na podstawie przeprowadzonej analizy badacze wyciągnęli następujące wnioski:

1. Model obliczeniowy szybkości spalania zaproponowany przez Babrauskasa jest bardziej dokładny dla średnicy tacy do 10 m, co wymaga dalszej weryfikacji dla większych średnic.
2. Stosunek wysokości płomienia do średnicy tacy jest mniejszy w przypadku modelu Thomasa i większy w przypadku modelu Heskestada w odniesieniu do rzeczywistych wyników. W przypadku średnicy tacy powyżej 10 m model Heskestada ma lepsze zastosowanie.
3. Wyniki uzyskane z modelu źródła punktowego oraz modelu Shokri-Beyler są akceptowalne w porównaniu z wynikami rzeczywistymi.

3. Metody i narzędzia służące do pomiarów promieniowania cieplnego, temperatury pożarów i wysokości płomienia

3.1 Pomiar promieniowania cieplnego

Prowadzenie pomiarów promieniowania cieplnego jest istotne ze względu na potrzebę poznania zjawisk zachodzących w trakcie pożaru. W przypadku badań termicznego przebiegu określonego zjawiska sam pomiar temperatury jest niewystarczający. Pomiary poziomu emitowanej energii bada się w odniesieniu do pożarów wysokoenergetycznych substancji, zwłaszcza węglowodorów (olej napędowy, paliwo lotnicze). Pomiary te są szczególnie skomplikowane z uwagi na wysokie temperatury i znaczne wartości energii, które są emitowane z powierzchni płomieni. Dodatkowe trudności polegają na wytworzeniu znacznych naprężeń termicznych i uszkodzeń w elementach instalacji pomiarowych.

Znaczna liczba układów pomiarowych dostępna na rynku bazuje na czujnikach chłodzonych cieczą, która w przypadku wysokich temperatur lub niedostatecznego przepływu osiąga temperaturę wrzenia, co może doprowadzić do uszkodzenia czujnika. Dużym wyzwaniem podczas pomiarów promieniowania cieplnego pochodzącego z pożarów węglowodorów jest obecność w produktach spalania cząstek węgla w postaci sadzy, które przywierają do powierzchni detektorów, powodują zmiany czułości i błędy w pomiarze. W celu eliminacji ww. problemów stosuje się szereg rozwiązań, do których należą m.in.:

1. przedmuchiwanie powierzchni detektorów silnym prądem powietrza,
2. zastępowanie wody innym czynnikiem chłodniczym o wysokiej temperaturze wrzenia,
3. stosowanie układów bardziej odpornych na działanie temperatury.

W przypadkach pożarów paliw pochodzenia węglowodorowego (ze znacznym udziałem węgla w cząsteczce) zastosowanie mają czujniki znajdujące się w trwałej obudowie, których element detekcji znajduje się za przeszkleniem/osłoną wykonaną np. z szafiru. Taki przyrząd jest odporny na temperaturę, jednakże długo-

trwałe oddziaływanie promieniowania może, mimo wszystko, powodować także jego uszkodzenia i przekłamania pomiarów.

Innym przykładem przyrządu pomiarowego, możliwym do zastosowania w przypadku pomiarów w pożarach wysokoenergetycznych substancji, jest kalorymetr. Urządzenie powinno być zbudowane z materiału mogącego przetrwać pożar. Stosuje się tutaj wysokogatunkowe stale np. INCONEL® Alloy 600. Dodatkowo do urządzenia wbudowuje się układ termoelementów w części niewystawionej na działanie promieniowania cieplnego wraz z izolacją termiczną. Przepływ energii przez powierzchnię kalorymetru jest wyznaczony na podstawie pomiarów temperatury po stronie „chłodnej” i danych na temat właściwości fizycznych materiału, z którego wykonana jest strona „chłodna” (m.in. przenikalność cieplna, pojemność cieplna).

Dostępne na rynku czujniki promieniowania cieplnego, np. Gardona lub Schmidta-Boeltera, działają na zasadzie zmiany napięcia, które jest wytwarzane wskutek ilości zaabsorbowanej energii na elemencie czułym urządzenia. Bazując na metodzie kalibracji, energia całkowita absorbowana na czujniku może być związana albo z promieniowaniem generowanym przez pożar testowy, albo z wiązką promieniowania wyłącznie prostopadłą do czujnika. W testach pożarowych oszacowanie strumienia ciepła zarówno w postaci promieniowania, jak i konwekcji, jest bardzo pożądane. Przepływ energii promieniowania cieplnego nie może być mierzony w odniesieniu do dwóch różnych powierzchni (materiałów), ponieważ ich właściwości są odmienne. W badaniach określających wpływ promieniowania na obiekty duże znaczenie ma pojemność cieplna tych obiektów. Ponadto konwekcja jest wrażliwa na dynamiczne zmiany temperatury i wymiary geometrii, co ma miejsce w testach w przestrzeniach otwartych. Należy mieć na względzie fakt, iż pomiary testowe pożarów pod kątem emitowanej energii są obciążone znacznym błędem, dochodzącym nawet do 40%¹².

W ostatnim czasie na rynku pojawiła się szeroka gama mierników ciepła. Powodem tego jest wzrost zapotrzebowania na tego typu urządzenia zarówno ze strony przemysłu, jak i badaczy. Komercyjnie dostępne urządzenia pomiarowe zostały wymienione poniżej:

1. miernik Gardona,
2. miernik Schmidta-Boeltera (S-B),
3. radiometry,
4. termopary i termostosy,
5. folie pomiarowe.

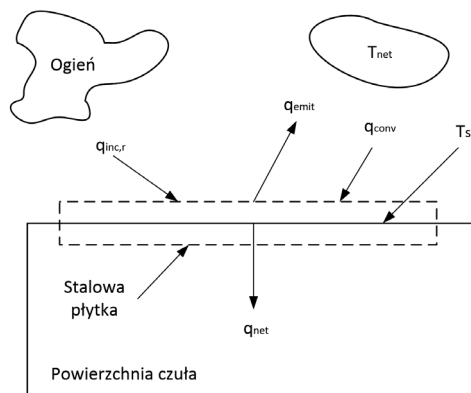
Czułość typowych detektorów niewykorzystujących optyki (S-G, Gardon, cienka folia) jest zazwyczaj określona w trakcie procesu kalibracji czujnika. Zatem, przed zakupem należy odpowiednio zdefiniować zakres pracy czujnika w związku

¹² *Uncertainty Analysis of Steady State Incident Heat Flux Measurements in Hydrocarbon Fuel Fires*, Sandia National Laboratories report SAND2005-7144, J.T. Nakos (red.), December 2005; *Estimates of Error Introduced when One-Dimensional Inverse Heat Transfer Techniques are Applied to Multi-Dimensional Problems*, C. Lopez, J. Koski, A. Razani (red.), Proceedings of NHTC'00, 34th ASME National Heat Transfer Conference, Pittsburgh, PA, August 20–22, 2000.

ze spodziewanym promieniowaniem od pożaru. Urządzenia kalibrujące są tak zbudowane, że nie uwzględniają wpływu konwekcji na poziom odczytu w tego typu układach pomiarowych. Stanowi to istotny problem z uwagi na fakt, że czujnik taki nie rejestruje całości promieniowania cieplnego. W środowisku pożarowym, w którym występuje promieniowanie w formie radiacji i konwekcji, nie można dokonać zamiany pomiaru tych dwóch rodzajów energii – chyba że czułość wykrywania konwekcji byłaby taka sama jak promieniowania cieplnego. Jednakże współczynniki czułości dla mierników promieniowania są inne dla promieniowania cieplnego i konwekcji. Testy kalibracyjne czujników S-B i Gardona wykazały różnicę w czułości względem promieniowania rzeczywistego, rejestrowanego na poziomie ok. 10%. Jeżeli taka różnica jest do zaakceptowania, to czujniki ww. typu mogą być zastosowane w pomiarach pożarów testowych.

Uniwersalny czujnik pomiarowy

Przekrój uniwersalnego czujnika promieniowania cieplnego zaprojektowanego przez instytut Sandia¹³ przedstawiono na ryc. 4 (którą opracowano na podstawie¹⁴). Powierzchnia urządzenia jest wystawiona na działanie typowego pożaru węglowodorowego o dużej mocy oraz poddana wpływom strumieni radiacyjnych i konwekcyjnych. Zakłada się, że na powierzchni czujnika nie będzie dochodziło do kondensacji pary wodnej oraz odkładania się sadzy. Całkowita wartość promieniowania cieplnego na powierzchni czujnika q_{net} jest funkcją promieniowania padającego $q_{inc,r}$, właściwości powierzchni (emisyjności i absorpcyjności, ϵ , α), strumienia odbitego $q_{emit} = \epsilon\sigma T_s^4$ i ciepła konwekcji pobranej lub oddanej $q_{conv} = h(T_\infty - T_s)$. T_s jest temperaturą powierzchni, h to współczynnik konwekcyjnego przepływu ciepła, T_∞ jest temperaturą swobodnego gazu znajdującego się nad powierzchnią czujnika.



Ryc. 4. Przekrój czujnika opracowanego w instytucie Sandia

Źródło: opracowanie własne.

¹³ National Laboratories Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550.

¹⁴ <http://www.scielo.br/> [dostęp: 19.02.2018].

Równanie (7) wyraża bilans energii, która może zostać odebrana przez czujnik:

$$e_{net} = \alpha q_{inc,r} - q_{emit} + q_{conv} \quad (7)$$

Równoważnik dla q_{emit} i q_{conv} :

$$q_{net} = \alpha q_{inc,r} - \varepsilon \sigma T_s^4 + h(T_\infty - T_s) \quad (8)$$

Zwykle dla ciała szarego zakłada się, że $\alpha = \varepsilon$. Przekształcając równanie (8), uzyskujemy rozwiązanie dla współczynnika $q_{inc,r}$:

$$q_{inc,r} = (q_{net}/\varepsilon) + \sigma T_s^4 - (h/\varepsilon)(T_\infty - T_s) \quad (9)$$

W trybie pracy czujnika istotne są energie oznaczone: $q_{inc,r}$ i q_{conv} . Określają one całkowitą energię, która jest absorbowana poprzez powierzchnię sensora. Całkowita energia dostarczona do powierzchni jest sumą energii padającej na powierzchnię i energii konwekcji:

$$q_{inc,t} = q_{inc,r} + h(T_\infty - T_s) \quad (10)$$

Stosuje się dwie metody do oszacowania całkowitej energii dostarczonej do powierzchni obiektu (czujnika). Bazują one na równaniu (9). Są to:

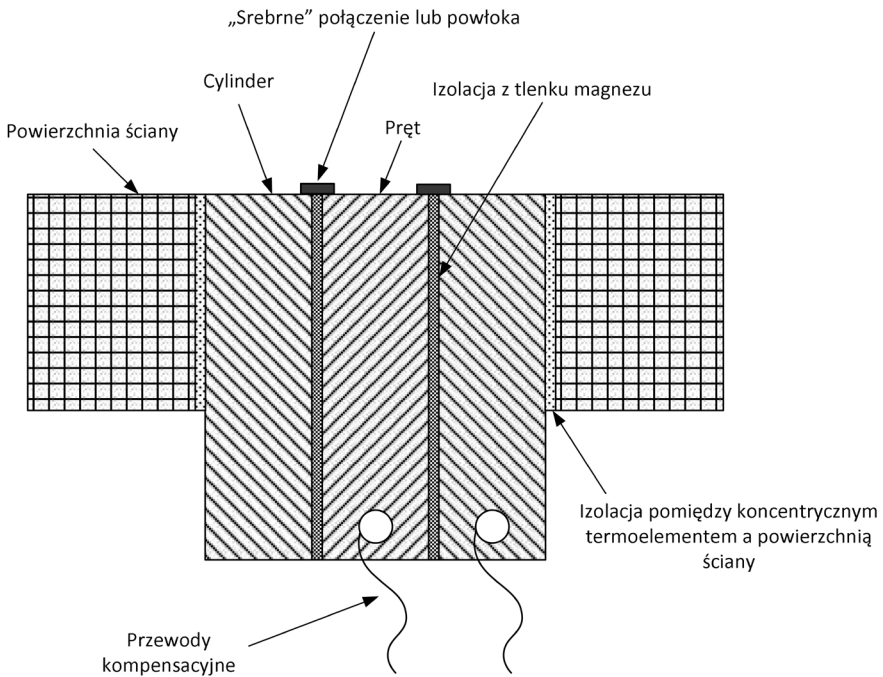
1. metoda „równowagi energetycznej,
2. metoda odwrotności współczynnika ciepła przewodzonego wraz z promieniowaniem emitowanym z materiału.

W obu metodach dąży się do pomiaru parametrów znajdujących się z prawej strony równania (10). Różnica metod polega na próbie pomiaru lub dedukcji ilości promieniowania q_{net} pochłoniętego przez materiał. W metodzie równowagi energetycznej, w celu określenia energii q_{net} , szacuje się ilość energii zmagazynowanej w materiale czujnika. Natomiast w drugiej z przedstawionych metod do oszacowania q_{net} wykorzystuje się odwrotną wartość współczynnika przewodności cieplnej. Obie metody zapewniają relatywnie poprawne oszacowanie wartości promieniowania cieplnego, ale obie także mają liczne nieścisłości, które mogą wprowadzić znaczne błędy.

Współosiowy (koncentryczny) czujnik promieniowania cieplnego oparty na termoelementach

Ten typ czujnika charakteryzuje się znaczną szybkością pomiaru temperatury powierzchni obiektu. Czujnik najpierw jest umieszczany na pewnej głębokości w przygotowanym otworze prostopadłym do powierzchni płaszczyzny. Metoda ta sprawdza się w sytuacji, gdy w materiale istnieje sposobność wykonania ww. otworu, co nie zawsze jest możliwe. Metoda charakteryzuje się krótkim czasem pomiaru i dużą dokładnością.

Przekrój poprzeczny koncentrycznego czujnika promieniowania cieplnego opartego na termoelementach przedstawiono na ryc. 5 (którą opracowano na podstawie¹⁵). Koncentryczny termoelement składa się z pręta o średnicy 10 mm, wykonanego ze stopu miedzi (60%) i niklu (40%). Pręt charakteryzuje się stałą rezystywnością (znikomą zależnością oporu od temperatury – tzw. stop konstantanu) i jest otoczony cylindrem o średnicy 1,6 cm wykonanym z chromowanej stali. Cienka warstwa izolacji (0,5 mm) z tlenku magnezu izoluje elektrycznie oba termoelektryczne elementy. Powierzchnie pręta oraz cylindra są połączone za pomocą przewodzącego prąd elementu miedzianego w kształcie pierścienia. Połączenie to jest bardzo delikatne i jego przerwanie często prowadzi do zaniku sygnału.



Ryc. 5. Przekrój poprzeczny przez element pomiarowy

Źródło: opracowanie własne.

Układ przedstawiony na ryc. 5 umożliwia w prosty sposób pomiar temperatury na powierzchni obiektu. Za pomocą równania energii (11) można oszacować wartość strumieniowania cieplnego lub jego natężenia:

$$\left[\frac{kA(T_1^{n+1} - T_2^{n+1})}{\Delta x} \right] - [qA] + \left[\frac{\rho C \Delta x A (T_1^{n+1} - T_1^n)}{2\Delta t} \right] = 0 \quad (11)$$

¹⁵ jw.

gdzie:

k – przewodność cieplna powierzchni materiału otaczającego termoparę,

A – powierzchnia otworu,

T_1 – temperatura powierzchni węzła,

T_2 – temperatura powierzchni następnego węzła w materiale,

ρ – gęstość termopary,

C – ciepło właściwe termopary,

Δx – grubość elementu łączącego mierzona jako prostopadła do powierzchni termopary,

q – promieniowanie cieplne,

Δt – dobrany krok czasowy.

Metoda ta doskonale sprawdza się w pomiarach promieniowania cieplnego, kiedy możliwe jest zastosowanie takiego samego materiału na termopary i cylinder (z ang. *outer thermo-element cylinder*). Zapewnia to uzyskanie zbieżnych wyników i nie wprowadza błędów pomiarowych. W przypadku gdy nie ma możliwości zastosowania takich samych materiałów, należy dokonać określenia możliwego błędu.

Metody oparte na inwersji przewodzenia ciepła

Metody oparte na zasadzie inwersji przewodzenia ciepła zakładają pomiar temperatury powierzchni, która nie jest bezpośrednio narażona na oddziaływanie płomienia. Wymagają one znajomości właściwości termicznych materiału, z którego wykonana jest powierzchnia oraz układ pomiarowy. Przez powierzchnię, na której dokonuje się pomiaru temperatury, przepływa energia cieplna z pożaru. Jest to energia sumaryczna, która pochodzi z promieniowania i konwekcji. Metoda ta znajduje zastosowanie zwłaszcza przy wyznaczaniu promieniowania cieplnego emitowanego z dużych pożarów testowych (np. węglowodorowych), kiedy inne czujniki nie gwarantują dłuższego działania. Metoda inwersji przewodzenia ciepła sprawdza się także w przypadkach, gdy płomień pożaru zmienia swoją geometrię lub istnieje możliwość wpływu na niego warunków pogodowych, np. wiatru.

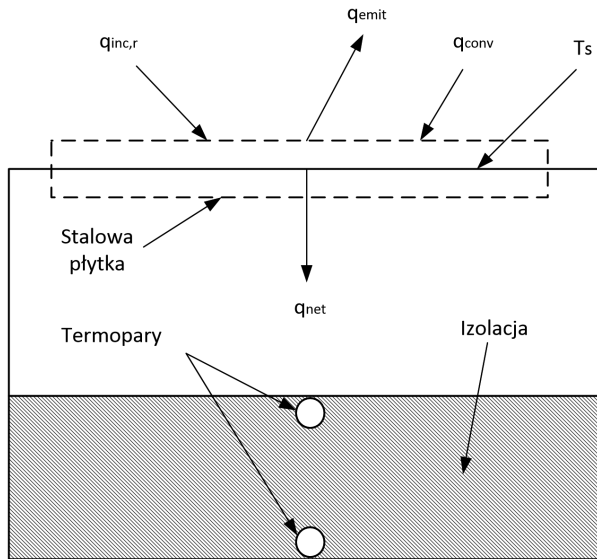
Należy mieć na uwadze, że warunki pożarowe są zmienne i mogą powodować szereg błędów odczytu w czujnikach, które są bezpośrednio narażone na działanie pożaru. Skutkiem tego będzie odczyt charakteryzujący się szumami – trudnymi do zinterpretowania i usunięcia.

Kalorymetr

Kalorymetry to szeroka grupa urządzeń stosowanych do pomiarów porównawczych promieniowania cieplnego z pożarów testowych. Typowa konfiguracja kalorymetru obejmuje termoelementy umieszczone na stronie nieekspozowanej na płomień, wykonanej z metalu połączonego z izolacją. Na ryc. 6 przedstawiono schemat przekroju poprzecznego kalorymetru, który opracowano na podstawie¹⁶.

¹⁶ jw.

Obsługa urządzenia wymaga znajomości właściwości termicznych materiałów w funkcji temperatury (przewodność cieplna i ciepło właściwe), z których wykonana jest stalowa płyta (z ang. *control volume*) oraz izolacja. Przy założeniu, że znana jest grubość materiałów oraz warunki brzegowe (m.in. zakres temperatur pożaru), można zastosować inwersję przewodzenia ciepła w celu oszacowania wartości energii promieniowania wnikażącej przez powierzchnię czynną czujnika.



Ryc. 6. Przekrój poprzeczny przez kalorymetr

Źródło: opracowanie własne.

Jako układ pomiaru temperatury można zastosować termoelementy o średnicy 1,6 mm wykonane w technologii MIMS (możliwe do wykorzystania termopary typ „K”) zamontowane po nieogrzewanej stronie metalowej płyty o grubości 1,6 mm wykonanej ze stopu typu Inconel 304 SS.

Metoda kalorymetryczna przekłada się na niewielkie koszty urządzenia, małe wymiary i wytrzymałość konstrukcji. Nie wymaga kalibracji. Jednak w celu zmniejszenia ilości danych powstających wskutek m.in. szumów, niezbędne jest zastosowanie oprogramowania do ich obróbki (np. SODDIT¹⁷ lub IHCP 1D¹⁸).

Kierunkowy pomiar temperatury (DFT)¹⁹

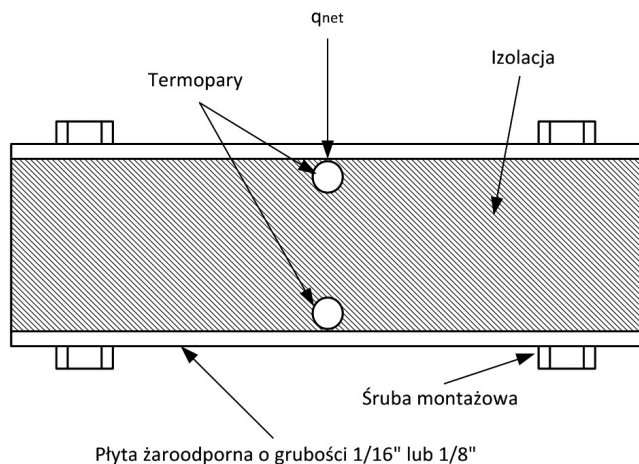
Zasada działania układu pomiarowego oparta jest na poddaniu metalowej płyty działaniu pożaru, do momentu osiągnięcia przez nią równowagi temperatu-

¹⁷ Sandia One-Dimensional Direct and Inverse Thermal.

¹⁸ V. Soti, *Estimation of Heat flux in One-Dimensional Inverse Heat Conduction Problem*, „International Mathematical Forum” 2007, 2(10), s. 455–464.

¹⁹ Directional flame thermometer.

wej ($\Delta T = 0$), tj. doprowadzeniu do takiej sytuacji, w której temperatura płyty będzie niezmienna w pewnym ustalonym zakresie. Stosuje się dwie płyty metalowe w kształcie kwadratu o długości boku 120,65 mm i grubości 1,6–3,2 mm wykonanych ze stopu Inconel 600. Powierzchnia płyt jest czarna lub oksydowana. Grubość zastosowanych termoelementów wynosi 1,6 mm i są one przykryte opisanymi wyżej płytami. Przekrój poprzeczny przez czujnik kierunkowego pomiaru temperatury (DFT) przedstawiono na ryc. 7 (którą opracowano na podstawie²⁰).



Ryc. 7. Przekrój poziomy przez DFT

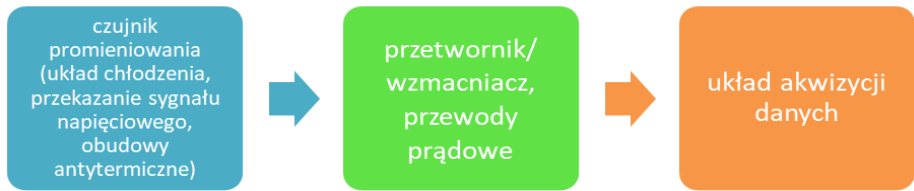
Źródło: opracowanie własne.

Jak pokazano na ryc. 7, pierwszy termoelement jest umieszczony pod płytą poddaną ogrzewaniu i położony na izolacji o grubości np. 2,5 cm wykonanej z wełny szklanej o dużej gęstości i jednorodności. Drugi termoelement zlokalizowany jest na spodniej powierzchni izolacji i przykryty od dołu kolejną metalową płytą. Grubość płyt powinna być dobrana w zależności od dynamiki pożaru. Cienkich płyt używa się, gdy dynamika pożaru jest niska, natomiast grubszych, gdy dynamika pożaru jest wysoka. Parametry te powinny być dobrane doświadczalnie.

Założenia techniczne systemu pomiarowego do badań promieniowania ciepłego pożarów rozlewisk oraz pożarów strumieniowych

Ogólna budowa systemu pomiarowego została przedstawiona na ryc. 8 w postaci schematu blokowego.

²⁰ <http://www.scielo.br/> [dostęp: 19.02.2018].



Ryc. 8. Układ blokowy systemu pomiarowego

Źródło: opracowanie własne.

Czujniki promieniowania ciepłego

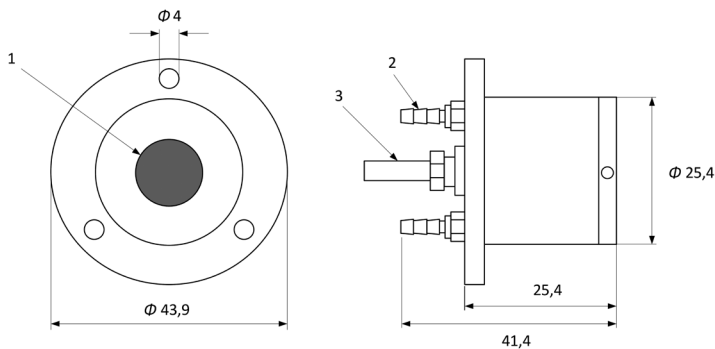
W celu wykonania pomiaru strumienia promieniowania ciepłego zaproponowano użycie czujników SBG01 chłodzonych cieczą typu Schmidta-Boeltera. Ryc. 9 ilustruje przykładowy czujnik.



Ryc. 9. Czujnik strumienia promieniowania ciepłego SBG01

Źródło: opracowanie własne.

SBG01 służy do pomiaru strumienia ciepłego pożaru i płomieni w zakresie pomiarowym do 200 kW/m^2 . Na ryc. 10 przedstawiono schemat i wymiary czujnika.



Ryc. 10. Czujnik SBG01, od prawej strony, widok od czoła pomiarowego, widok z boku. Wymiary w mm

Powlekaną element czuły (1), rurka chłodzenia cieczą (2), kabel sygnałowy (3); średnica wewnętrzna rurki doprowadzającej wodę: 3 mm

Źródło: opracowanie własne.

Czujnik SBG01 – z uwagi na pasywny charakter pracy – nie wymaga zasilania. W trakcie oddziaływania na niego promieniowania cieplnego generuje napięcie, które jest proporcjonalne do wartości strumienia cieplnego. Wartość przeliczeniową przyrostu napięcia podaje producent. W prostym ujęciu, aby przekształcić mierzone napięcie V_{sen} na strumień cieplny ϕ , napięcie należy podzielić przez czułość E_{sen} , stałą wyznaczaną indywidualnie i dostarczaną z każdym czujnikiem.

$$\phi = V_{sen}/E_{sen} \quad (12)$$

Do badań pożarowych można zastosować czujniki SBG01-25 pracujące w zakresach do:

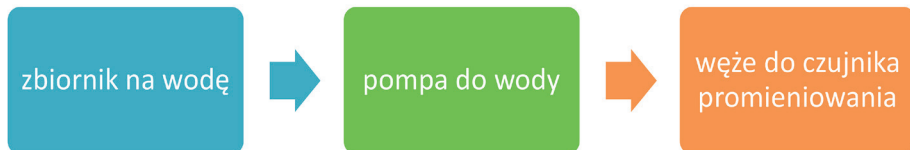
- 10 kW/m²,
- 50 kW/m²,
- 100 kW/m².

Zakresy zostały dobrane w taki sposób, aby umożliwiać pomiar promieniowania w różnych odległościach od pożaru strumieniowego.

Jeżeli badania będą prowadzone przy temperaturach zewnętrznych dodatnich (powyżej 15°C), to chłodzenie czujnika powinno być realizowane za pomocą wody. Woda posiada wysoką pojemność cieplną i będzie skutecznym środkiem odprowadzającym ciepło. Dla czujników SBG01 o wymiarach obudowy 1 x 1 cal (25,4 x 25,4 mm) do odprowadzenia ciepła strumień wody powinien być podawany z wydajnością ok. 30 l/h. Przy czym należy także rozważyć kwestię dodatkowego chłodzenia wody do układu przy pomocy np. lodu, który będzie umieszczany w zasobniku z wodą. Powyższe ma na celu uzyskanie najkorzystniejszego bilansu cieplnego i niedopuszczenie do uszkodzenia czujników.

Z uwagi na znaczne rozmiary całkowite stanowiska badawczego (zasięg pożaru), w przypadku zastosowania centralnego systemu dostarczania wody do kilku czujników należałoby przygotować odcinki węzowe o długości co najmniej 50–60 m. W takim układzie opory stawiane przez przepływ wody w wężu o średnicy wewnętrznej 3 mm osiągałyby wartość ok. 6 m słupa wody. Wymagałoby to zastosowania układu pompowego generującego znaczną wartość ciśnienia na wejściu. Z uwagi na konieczność użycia węży z tworzyw sztucznych mogłoby dojść do ich uszkodzenia lub powstania nieszczelności na połączeniach. Ze względu na brak możliwości rezygnacji z układu chłodzenia²¹ i w związku z problemem przedstawionym wyżej wskazane jest zastosowanie układu chłodzenia jednostkowego. Dla każdego z sześciu czujników będzie wykonany osobny układ chłodzenia znajdujący się w pobliżu czujnika wg poniższego schematu blokowego (ryc. 11).

²¹ Producent czujników SBG01 dopuszcza ich pracę bez chłodzenia przez krótki czas (kilka sekund) lub przy niskich wartościach promieniowania. Graniczna wartość temperatury obudowy czujnika to 80°C.



Ryc. 11. Schemat blokowy układu chłodzenia

Źródło: opracowanie własne.

Zbiorniki na wodę

W sąsiedztwie każdego z czujników promieniowania powinien być zlokalizowany zbiornik z wodą (z dodatkiem lodu w przypadku nagrzewania się wody powyżej 30°C). Zbiornik/pojemnik powinien posiadać objętość ok. 20 dm³ oraz zamykany otwór górny o wymiarze poprzecznym nie mniejszym niż 10 cm. Otwór jest potrzebny do umieszczenia w zbiorniku pompki wody oraz zasilania (energia i woda). Zbiornik nie powinien być wykonany z tworzywa sztucznego z uwagi na pracę układu w polu podwyższonych temperatur – możliwe nagrzewanie się ścianek zbiornika wskutek oddziaływania pożaru. Zalecanym materiałem jest blacha. Za zbiornik może służyć np. metalowe wiadro²² na farbę ze szczelną pokrywą o pojemności 20 dm³. W pokrywie zbiornika należy wykonać dwa otwory o średnicy 15 mm każdy. Krawędzie otworów powinny zostać zabezpieczone przed uszkodzeniem przechodzących przez nie przewodów zasilania pompki, a także rurek z wodą na tłoczeniu i powrocie z czujnika promieniowania.

W trakcie badań należy kontrolować temperaturę wody w zbiornikach poprzez umieszczenie w wodzie termopar. Jej wartość nie może przekroczyć 30°C, gdyż grozi to uszkodzeniem czujnika.

Pompa do wody

Zadaniem pompy jest zasilenie układu chłodzenia w wodę i doprowadzenie jej do czujnika pod odpowiednim ciśnieniem i przy określonym wydatku. Przed ostatecznym zmontowaniem układ chłodzenia należy przetestować w celu dobrania odpowiednich przepływów oraz ustalenia ciśnień z uwzględnieniem różnic poziomów²³, jakie wystąpią podczas badań. Pompa będzie zanurzona w wodzie, którą będzie podawać do czujnika. Ciecz po schłodzeniu czujnika będzie zawracana (wężem powrotnym) do zbiornika. Pompa zasilana będzie napięciem nieprzekraczającym 12 V. Można to zrealizować poprzez zasilacze 230 V AC na 12 V DC.

Przewody na wodę

Według karty producenta czujników SBG01 woda powinna być doprowadzona wężem wykonanym z tworzywa sztucznego o średnicy wewnętrznej 3 mm i ze-

²² <https://www.b2b-partner.pl/wiadro-metalowe-z-wieczkiem-20-l/> [dostęp: 28.02.2019].

²³ Czujnik promieniowania może być umieszczany na trzech różnych wysokościach.

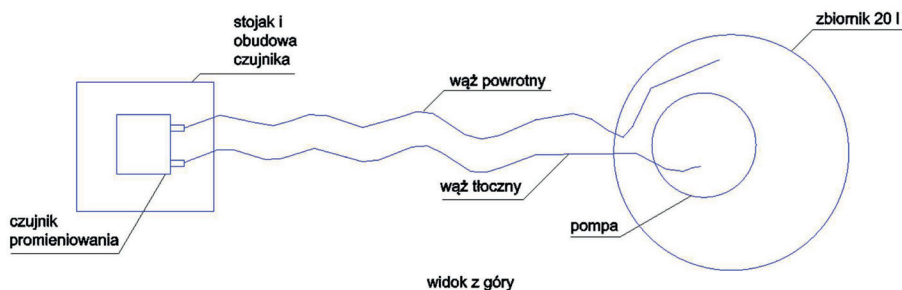
wewnętrznej 6 mm. Z uwagi na to, że zasilanie czujników odbywać się będzie w strefie oddziaływania znacznych temperatur oraz warunków niemożliwych do określenia na etapie poprzedzającym badania, wykonano analizę stosowalności poszczególnych rodzajów węży. W tabeli 2 przedstawiono różnego typu węże oraz ich podstawowe dane użytkowe²⁴.

Tabela 2. Zestawienie węży możliwych do zastosowania

NAZWA	NR KATALOGOWY	MATERIAŁ	ZAKRES TEMPERATUR	DŁUGOŚĆ ZAKUPU JEDNOSTKOWEGO
Wąż silikonowy zbrojony FTPR	FTPR-3	silikon	od -60°C do +200°C	25 m
Węże silikonowe Rausil ²⁵	REH-0307	RAU-SIK 8368 Shore A 60±5	od -60°C do +180°C	metr bieżący
Węże teflonowe PTFE ²⁶	brak	teflon (PTFE)	od -70°C do +260°C	50 m

Źródło: opracowanie własne na podstawie <https://www.pneumat.com.pl> [dostęp: 28.02.2019].

Mając na uwadze powyższe, zalecane jest zastosowanie węża z materiału typu teflon lub FTPR. Na ryc. 12 przedstawiono schemat poglądowy układu chłodzenia pojedynczego czujnika. Długości rurek doprowadzających i odprowadzających wodę z czujnika wynoszą od 1 m do 3 m.



Ryc. 12. Schemat poglądowy układu chłodzenia czujnika

Źródło: opracowanie własne.

Przekazywanie sygnału z czujnika

Przekazanie sygnału z czujnika do układu akwizycji odbywa się według schematu blokowego przedstawionego na ryc. 13.

²⁴ <http://www.pneumat.com.pl> [dostęp: 28.02.2019].

²⁵ Dostępna jest żaroodporna osłona węża.

²⁶ Węże PTFE są stosunkowo sztywne, ale dają się kształtować.



Ryc. 13. Schemat blokowy przekazania sygnału z czujnika do układu akwizycji

Źródło: opracowanie własne.

Przewód sygnałowy

Czujnik SBG01 jest wyposażony w jeden kabel sygnałowy (o długości 25–60 m), który przekazuje do układu akwizycji napięcie o wartości ok. 5–10 mV.

Kable, odbierając szum pojemnościowy, mogą stanowić źródło zakłóceń. Ogólnym zaleceniem jest utrzymywanie jak najmniejszej odległości między miernikiem lub wzmacniaczem a układem akwizycji. Kabel sygnałowy dostarcza producent czujników. Jest to kabel o średnicy 3,1 mm w izolacji teflonowej, dwużyłowy ekranowany, z miedzianymi żyłami (w Hukseflux używa się trójżyłowego kabla ekranowanego, z którego wykorzystywane są tylko dwie żyły). Żyły są izolowane teflonem (czarnym i białym). Przedłużenie kabla (połączenie) polega na przylutowaniu żył przedłużenia oraz ekranu do kabla oryginalnego oraz uszczelnieniu połączenia koszulkami termo.

W tabeli 3 przedstawiono podłączenie elektryczne czujnika SBG01. Wyjście czujnika jest zazwyczaj podłączane do różnicowego wejścia napięciowego.

Tabela 3. Podłączenie elektryczne

PRZEWÓD	KOLOR	SYSTEM POMIAROWY
Sygnal wyjściowy +	biały	Wejście napięciowe +
Sygnal wyjściowy -	czarny	Wejście napięciowe – lub masa (analogowa)
Ekran	---	Masa (analogowa) lub wejście napięciowe

Źródło: opracowanie własne.

Przetwornik

Na kablu sygnałowym co 25 m dla każdego czujnika SBG01. W przypadku silnych zakłóceń sygnału można zastosować przetwornik np. model P30U z wejściem programowalnym mV na 4...20 mA.

Przewód prądowy

Na wyjściu z przetwornika P30U do układu akwizycji można zastosować przewód ekranowany niskonapięciowy, np. CA9-2XSL(St)Yv PiMF (LSF) 300/500 V 4x2x0,5c.

Akwizycja danych

Do gromadzenia danych można zastosować rejestrator np. 16-kanalowy MS6D lub 8-kanalowy DI-2008 wraz z oprogramowaniem umożliwiającym sterowanie

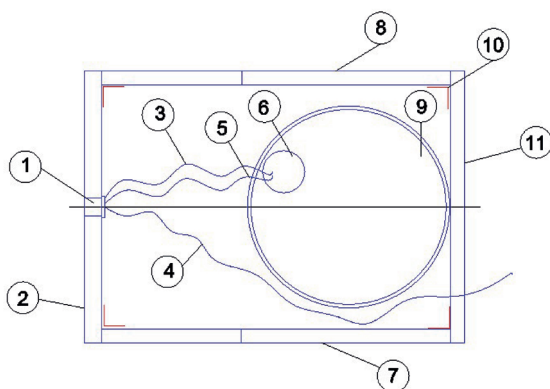
systemem, m.in. w zakresie doboru częstości próbkowania, czułości odbieranego sygnału, generowania wykresów, eksportu zebranych danych itp.

Oslony termiczne

Układ przedstawiony na ryc. 14 powinien znaleźć się w pobliżu pożaru strumieniowego. Urządzenia zlokalizowane w pobliżu silnych źródeł promieniowania muszą zostać osłonięte za pomocą niepalnych, izolujących przegród, zabudowanych w konstrukcje. Jako materiał osłonowy proponuje się zastosować płyty ogniochronne PROMATECT-L500 o grubości 25 mm na płyty czołowe oraz 20 mm na płyty boczne. Płyty są materiałem samonośnym i prostym w obróbce mechanicznej. Pozwala to na budowę zaproponowanych obudów osłon termicznych. Na uwagę zasługuje też stosunkowa niska gęstość materiału, z którego wykonana jest płyta, co przekłada się na akceptowalny ciężar zaprojektowanych osłon.

Na ryc. 14 przedstawiono widok z góry na osłonę wraz z rozmieszczeniem w niej wszystkich urządzeń i materiałów. Poniżej zamieszczono opisy elementów składowych.

- 1) czujnik promieniowania,
- 2) płyta czołowa PROMATECT L500 grub. 25 mm,
- 3) przewód wody powrotnej,
- 4) przewód sygnałowy czujnika promieniowania,
- 5) przewód wody chłodzącej,
- 6) pompa zanurzeniowa,
- 7) płyta boczna osłony termicznej PROMATECT L500 grub. 20 mm,
- 8) płyta boczna osłony termicznej PROMATECT L500 grub. 20 mm,
- 9) pojemnik na wodę, poj. 20 dm³,
- 10) kątownik stalowy 30 × 30 × 2,
- 11) płyta boczna osłony termicznej PROMATECT L500 grub. 20 mm.



Ryc. 14. Widok z góry na osłonę termiczną oraz rozmieszczenie w niej urządzeń chronionych przed promieniowaniem

Źródło: opracowanie własne.

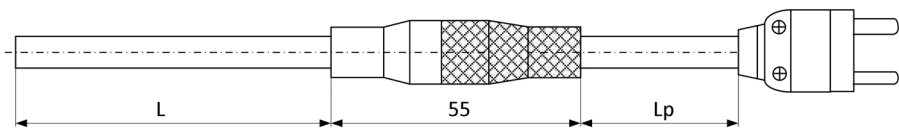
3.2 Pomiar temperatury

Zgodnie z założeniami, w trakcie badań należy prowadzić pomiar temperatury w funkcji czasu i odległości od płonącej tacy z paliwem oraz pożaru strumieniowego. Pomiar ma na celu rejestrację rozkładu temperatury w trakcie pożarów powierzchniowych cieczy palnych, takich jak olej napędowy, benzyna i etanol, w tacach o średnicach 1 m, 3 m i 6 m oraz pożaru strumieniowego spalanego gazu LPG o różnej charakterystyce. Na potrzeby badań poligonowych wypracowano specyfikację dotyczącą systemu pomiarowego temperatury. System składa się z 3 podstawowych elementów, tj. czujnika, miernika oraz zespołu mocowania.

Nieuniknionym aspektem badań jest fakt oddziaływania promieniowania cieplnego oraz wysokiej temperatury na sprzęt pomiarowy. Fakt ten determinuje rodzaj dobranych komponentów systemu oraz sposób jego montażu i zabezpieczenia.

Do pomiaru temperatury zakłada się wykorzystywanie termopar typu „K” (NiCr-Ni) w liczbie 12 szt. oraz 3 szt. termopar typu „N” (NiCrSi-NiSi). Termoelement typu „K” stosowany jest w zakresie temperatur od -200°C do $+1200^{\circ}\text{C}$. Zależność SEM od temperatury dla tego termoelementu jest prawie liniowa, a jego czułość wynosi $41 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$. Termopary typu „N” mogą być używane w środowisku utleniającym, nawet w zakresie wysokich temperatur do $+1200^{\circ}\text{C}$. Ten typ termopar będzie użyty podczas badań do pomiaru temperatury w tacy, gdzie płomień będzie oddziałował bezpośrednio na termopary od momentu jego zapłonu do wypalenia się badanej substancji.

Termopary w bezpośrednim polu pracy będą posiadały płaszcz odporny na wysokie temperatury o długości 5 m zakończony przewodem kompensacyjnym o długości minimalnej ok. 3 m zakończonym miniaturową wtyczką typu S-010. Zestaw termopary przedstawia schemat na ryc. 15.



Ryc. 15. Zestaw termopary płaszczowej z przewodem kompensacyjnym i wtyczką (L – płaszcz 5 m, L_p – przewód kompensacyjny 3 m)

Źródło: opracowanie własne.

Termopara musi być połączona z przetwornikiem za pomocą odpowiedniego przewodu kompensacyjnego. Przewody kompensacyjne są to przewody wykonane zazwyczaj z materiału zastępczego, tego samego co przynależny im termoelement, i mogą być stosowane w zakresie do 200°C . Przewody kompensacyjne składają się ze stopów, które mają taką samą charakterystykę jak termopary w zakresie dopuszczalnej temperatury pracy dla przewodów kompensacyjnych. Przewód powinien

być odpowiednio dobrany do użytego czujnika (wyróżnione są one odpowiednią kolorystyką). W tabeli 4 wskazano specyfikację dla termopar typu „K” oraz typu „N”, przewodów kompensacyjnych oraz wtyczek.

Tabela 4. Specyfikacja termopar

LP.	TYP	ILOŚĆ	DŁUGOŚĆ PŁASZCZA	RODZAJ PŁASZCZA	DŁUGOŚĆ PRZEWODU	RODZAJ PRZEWODU	KLASA
1	Termopara typu „K”	16	3 m	Stal żaroodporna AISI446, 1.4762 (do +1200°C)	3 m	Żyły: silikon Płaszcz: silikon (do +180°C)	1
2	Termopara typu „N”	5	5 m	Stal żaroodporna Pyrosil®D (do +1250°C)	3 m	Żyły: silikon Płaszcz: silikon (do +180°C)	1

Źródło: opracowanie własne.

Oznaczenie termopary typu „N”: TTP-N-TKbW-I-P15-1-SO-5000-3000-SLSL.

Oznaczenie termopary typu „K”: TTP-K-TKbW-I-Z15-1-SO-3000-3000-SLSL.

Kolejnym krokiem w ramach projektowania układu pomiarowego jest dobranie odpowiedniego modułu do szczytowania danych. Termopary zostaną podłączone do przetwornika przeznaczanego do rejestracji danych z termopar, tzw. modułu termopar NI 9214, poprzez blok przyłączeniowy TB-9214. Moduł będzie wpinany do kontrolera NI typu NI cDAQ 9174. Zakres temperatur pracy zestawu wynosi od -40°C do +70°C. Na ryc. 16 przedstawiono wyżej wymieniony zestaw.



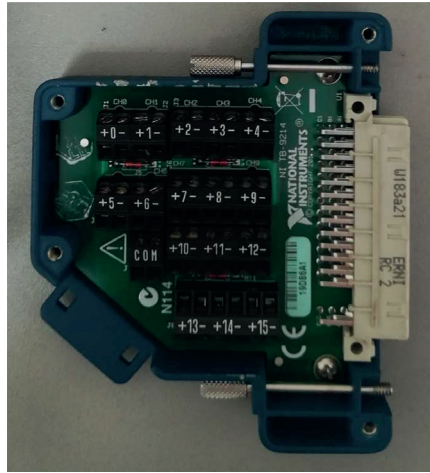
Ryc. 16. Elementy przetwornika sygnału z termopar

Źródło: opracowanie własne.

Do bloku wpina się termopary za pomocą zacisków, jak na ryc. 17. Przykładowe zestawienie pokazano na ryc. 18.

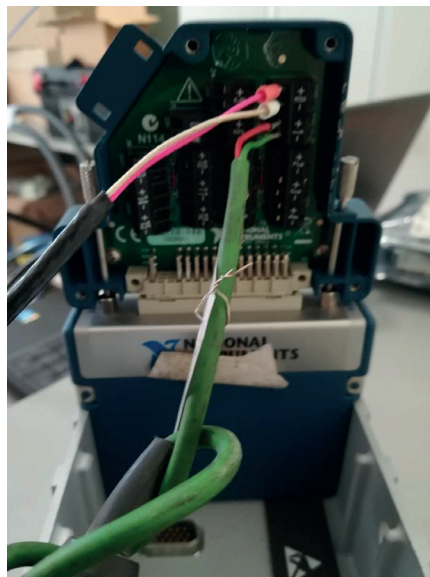
ROZDZIAŁ I

Pomiary promieniowania ciepłego i temperatury pożarów rozlewisk ciecziy oraz pożarów strumieniowych – założenia koncepcyjne do badań w dużej skali



Ryc. 17. Blok przyłączeniowy z zaciskami

Źródło: opracowanie własne.



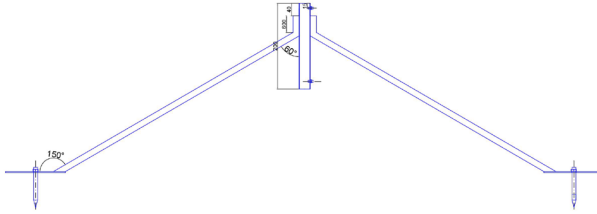
Ryc. 18. Przykładowy sposób wpięcia termopar

Źródło: opracowanie własne.

Zastosowanie kontrolera NI pozwala na dalsze rozbudowywanie systemu poprzez dokładanie kolejnych modułów rejestrujących inne sygnały, np. napięciowe. Podłączenie kontrolera NI do komputera odbywa się za pomocą łącza USB 2.0. Kontroler może pracować zarówno w środowisku Windows, jak i Linux. Do obsługi karty i oprogramowania może służyć laptop.

Akwizycja danych będzie wykonywana za pomocą podstawowego oprogramowania NI SignalExpress 2015 przeznaczonego do zapisu odczytu z kontrolera cDAQ 9174 wielu parametrów mierzonych, w tym sygnałów otrzymywanych z termopar. SignalExpress to interaktywne narzędzie informatyczne, które umożliwia szybkie rejestrowanie, pozyskiwanie, analizowanie i prezentowanie danych z wielu urządzeń i instrumentów do zbierania danych, bez konieczności programowania.

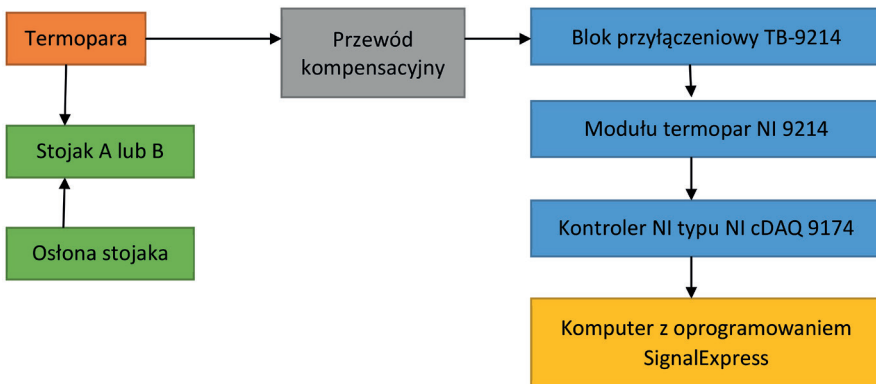
Termopary powinny być zamontowane na odpowiednio stabilnych stojakach, na dwóch wysokościach. Założono wykonanie stojaków z rurek stalowych, w środku których umieszczone będą przewody. Dla najbardziej narażonych termopar w bezpośrednim sąsiedztwie tacy testowej należy zapewnić odpowiednie osłony w postaci np. wełny mineralnej. Stojak do pomiaru temperatury nad tacą powinien być wykonany z materiałów odpornych na wysoką temperaturę (np. stali żaroodpornej, spawalnej). Budowę stojaka ilustruje ryc. 19. Składa się on z podstawy oraz słupka z nawierconymi otworami do montażu termopar. Stojaki dla termopar pomiarowych znajdujących się najbliżej źródła ognia mogą różnić się przekrojami oraz gatunkami zastosowanej stali.



Ryc. 19. Podstawa – widok boczny

Źródło: opracowanie własne.

Na ryc. 20 ukazano schemat blokowy systemu przeznaczonego do pomiaru temperatury.

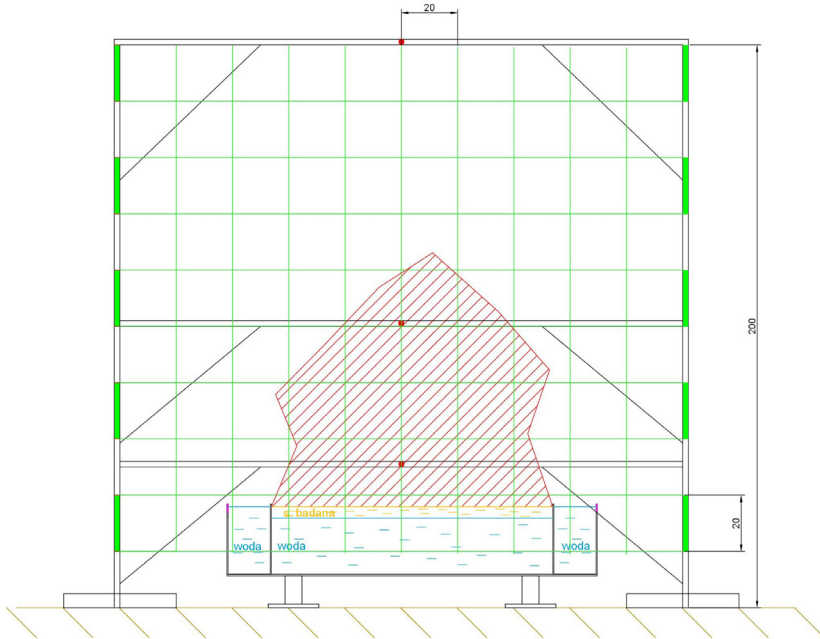


Ryc. 20. Schemat blokowy systemu przeznaczonego do pomiaru temperatury

Źródło: opracowanie własne.

3.3 Pomiar wysokości płomienia

Podczas eksperymentu spalania cieczy palnej w tacach przewiduje się dokonanie pomiaru wysokości płomienia. Płomień na powierzchni spalanej cieczy w warunkach zewnętrznych może być bardzo zróżnicowany i podatny na zawirowania. W celu wyznaczenia jego wysokości założono, że pomiar będzie wykonany na zasadzie obserwacji wizyjnej z punktem odniesienia. Do wyznaczenia wysokości płomienia zdecydowano się wykorzystać słupki o wysokości 2 m, na które farbą ognioodporną naniesione zostaną 20-centymetrowe podziałki. Zakłada się utrwalanie obrazu przy pomocy kamery. Płomień o wysokości powyżej punktu odniesienia będą wyznaczone na zasadzie ekstrapolacji. Metoda ta wyeliminuje duże błędy pomiaru spowodowane optyką urządzenia rejestrującego. Ustawienie punktów odniesienia w bezpośredniej linii pozwoli na wyznaczenie wysokości z dokładnością do jednej podziałki, tj. 20 cm. W celu wyznaczenia wysokości płomienia można poddać obróbce graficznej stopklatki z nagrania wideo. Na zdjęcie nanieść można siatkę z odpowiednio dobraną skalą. Schematyczny przykład wyznaczenia wysokości został zilustrowany na ryc. 21. W tym przykładzie wysokość płomienia zawiera się pomiędzy 120 cm a 140 cm. Po obu stronach tacy ustawione są oznaczone i wyskalowane (zamalowane co 20 cm pola) słupki do montażu termopar pomiarowych.



Ryc. 21. Schemat zasady pomiaru wysokości płomienia

Źródło: opracowanie własne.

Tak wyznaczone wysokości płomienia odnieść należy do obliczeń teoretycznych. Do obliczeń zastosować należy korelację pomiędzy wysokością płomienia a średnicą płonącego rozlewiska²⁷ o kształcie koła, zaproponowaną przez Thomasa²⁸.

$$\frac{H}{D} = 42 \cdot \left(\frac{m''}{\rho_a \sqrt{gD}} \right)^{0,61} \quad (13)$$

gdzie:

m'' – szybkość spalania masowego [$\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$],

ρ_a – gęstość powietrza [kg/m^3],

g – przyspieszenie grawitacyjne [m/s^2].

Do pomiaru promieniowania cieplnego podczas testów poligonowych należałoby zastosować:

- 2 czujniki w zakresie roboczym do $10 \text{ kW}/\text{m}^2$,
- 2 czujniki w zakresie roboczym do $50 \text{ kW}/\text{m}^2$,
- 2 czujniki w zakresie $100 \text{ kW}/\text{m}^2$.

Zakłada się użycie czujników SBG01 typu Schmidta-Boeltera w obudowie z materiału niepalnego, np. płyty żaroodpornej przykręconej do stalowych słupów o przekroju kwadratu, o wysokości 1,5 m ponad poziom gruntu, wkopanej w ziemię. Wewnątrz układ powinien zostać zaizolowany poprzez włożenie materiału, np. wełny mineralnej. Czujniki są chłodzone wodą, więc wymagany powinien być układ przepływu wody o ciśnieniu 3–5 bar przy przepływie do 30 l/h. Wychodzący z czujnika sygnał jest napięciowy, więc można wykonać pomiar z dużej odległości. Wstępnie czujniki powinny być ustawione w odległościach takich jak termopary. Ostateczne rozstawienie czujników powinno zostać dobrane w trakcie badań, zależnie od zasięgu płomienia i innych okoliczności wynikających ze specyfiki badawczej.

4. Podsumowanie i wnioski

W ramach projektowanych badań pożarów do wykonania przewidziano trzy systemy pomiarowe: temperatury, promieniowania cieplnego oraz wysokości płomienia. Ich zaprojektowanie i wykonanie zapewnią realizację pomiarów w trakcie pożaru strumieniowego oraz pożaru powierzchniowego. Układ powinien zostać skonfigurowany do pracy w warunkach poligonowych i działania w zmiennych

²⁷ R. Bubbicoa, G. Dusserreb, B. Mazzarotta, *Calculation of the Flame Size from Burning Liquid Pools*, „Chemical Engineering Transactions” 2016, 53.

²⁸ P.H. Thomas, *The Size of Flames From Natural Fires*, 9th International Symposium on Combustion, Academic Press, New York 1963, s. 844–859.

warunkach pogodowych, które winny być monitorowane. Parametry pogodowe, tj. wilgotność, temperatura, prędkość i kierunek wiatru należy rejestrować w trakcie prowadzenia pomiarów. Mając na uwadze mobilność stanowisk do pomiaru opisanych wyżej parametrów, powinno być możliwe wykonywanie pomiarów w różnych miejscach w zależności od warunków meteorologicznych oraz sytuacji pożarowej.

Wykonanie pomiarów umożliwi pogłębienie wiedzy z zakresu m.in. zagrożeń powodowanych przez określone typy pożarów, których skala pozwala na porównanie ich do sytuacji pożarowych mających miejsce np. w przemyśle. Uzyskane parametry promieniowania cieplnego oraz temperatury dają możliwość oszacowania skutków takiego pożaru, np. dla ludzi, dobytku, budowli, środków transportu, ratowników i ich wyposażenia. W przyszłości wyżej wymienione dane będą niezbędne do opracowania nowatorskich zabezpieczeń i systemów w Państwowej Straży Pożarnej, które zwiększą efektywność działań w trudnych warunkach.

Literatura

- Blanchat T., Figueroa V., *Large-Scale Open Pool Experimental Data and Analysis for Fire Model Validation and Development*, „Fire Safety Science” 2008, 9, <https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.9-105>.
- Bubbicoa R., Dusserreb G., Mazzarotta B., *Calculation of the Flame Size from Burning Liquid Pools*, „Chemical Engineering Transactions” 2016, 53.
- Estimates of Error Introduced when One-Dimensional Inverse Heat Transfer Techniques are Applied to Multi-Dimensional Problems*, C. Lopez, J. Koski, A. Razani (red.), Proceedings of NHTC'00, 34th ASME National Heat Transfer Conference, Pittsburgh, PA, August 20–22, 2000.
- Hockey S.M., Rew P.J., *Review of Human Response to Thermal Radiation*, Health and Safety Executive, Epsom 1996, 87.
- Kubik J., *Podstawy fizyki budowlanej*. Podręcznik akademicki, Politechnika Opolska, Opole 2008.
- Pofit-Szczepeńska M., *Wybrane zagadnienia z chemii ogólnej, fizykochemii spalania i rozwoju pożarów*, SA PSP w Krakowie, Kraków 1994.
- Sawicki T., *Czynniki zagrażające bezpieczeństwu strażaków w warunkach pożaru*, „Bezpieczeństwo Pracy” 2004, 7–8.
- Soti V., *Estimation of Heat flux in One-Dimensional Inverse Heat Conduction Problem*, „International Mathematical Forum” 2007, 2(10).
- Thomas P. H., *The Size of Flames From Natural Fires*, 9th International Symposium on Combustion, Academic Press, New York 1963.
- Uncertainty Analysis of Steady State Incident Heat Flux Measurements in Hydrocarbon Fuel Fires*, Sandia National Laboratories report SAND2005-7144, J.T. Nankos (red.), December 2005.

Wiśniewski S., Wiśniewski T.S., *Wymiana ciepła*, WNT, Warszawa 2000.
Zhen C., Xiaolin W., *Analysis for Combustion Properties of Crude Oil Pool fire*,
„Procedia Engineering” 2014, 84.
<http://www.scielo.br/> [dostęp: 19.02.2018].
<https://www.b2b-partner.pl/wiadro-metalowe-z-wieczkiem-20-l/>
[dostęp: 28.02.2019].
<http://www.pneumat.com.pl> [dostęp: 28.02.2019].

ROZDZIAŁ II.

BADANIA POŻARÓW POWIERZCHNIOWYCH I STRUMIENIOWYCH W DUŻEJ SKALI

Jarosław Tępiński, Bartłomiej Połeć,
Wojciech Klapsa, Piotr Lesiak

*Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwpożarowej
im. Józefa Tuliszkowskiego – Państwowy Instytut Badawczy*

1. Wprowadzenie

Pożary strumieniowe powstają, gdy palna ciecz lub gaz ulega zapaleniu podczas wypływu pod wysokim ciśnieniem z uszkodzonego zbiornika, rurociągu lub innej części instalacji. Pożary powierzchniowe inicjowane są w wyniku wycieku substancji palnej i utworzenia rozlewiska na powierzchni stałego podłoża, a następnie zapłonu uwolnionych par palnych z jego powierzchni. Paliwo stanowi stały dopływ par palnych, powstających w wyniku ciepła dostarczanego do powierzchni cieczy od płomienia¹.

Pożary powierzchniowe i strumieniowe cieczy palnych są najczęściej występującymi rodzajami pożarów w przemyśle, a także w innych sektorach gospodarki narodowej. Może do nich dojść wszędzie tam, gdzie ciekłe lub gazowe substancje niebezpieczne są składowane bądź przetwarzane. Poznanie charakterystyki takich pożarów, w zależności od spalanej cieczy lub gazu, może pozwolić lepiej oszacować ryzyko i potencjalne skutki ich uwolnienia. Wyniki testów mogą służyć do bezpośredniego projektowania odpowiednich zabezpieczeń oraz posłużyć do walidacji oprogramowania wykorzystywanego do obliczeń numerycznych potencjalnych zagrożeń.

Głównym celem realizacji projektu pt. „Program do oceny ryzyka wystąpienia awarii w obiektach przemysłowych stwarzających zagrożenie poza swoim terenem” (akronim EVARIS) jest opracowanie programu RAT-if (ang. *Risk Assessment Toolbox at Hazardous Industrial Facilities Posing Threat Outside their Area*). Aplikacja umożliwia obliczenie zasięgu skutków awarii przemysłowych i wyznacza bezpieczne odległości od obiektów przemysłowych posiadających na swoim terenie substancje niebezpieczne. W celu weryfikacji i walidacji narzędzia informatycznego RAT-if przeprowadzono badania doświadczalne pożarów powierzchniowych i strumieniowych. Ze względów bezpieczeństwa badania doświadczalne przeprowadzono na stanowiskach badawczych posadowionych na terenie poligonu szkoleniowego zlokalizowanego w Ośrodku Szkolenia w Pionkach Komendy Wojewódzkiej Państwowej Straży Pożarnej w Warszawie. Na stanowiskach poligonowych przeprowadzono badania pożarów powierzchniowych i strumieniowych, podczas których dokonano pomiarów promieniowania cieplnego, temperatury oraz wiel-

¹ <https://pse-safety.com/podstawowe-rodzaje-pozarow/> [dostęp: 7.02.2020].

kości płomieni. Powyższe wielkości fizyczne wyznaczono w funkcji odległości, lokalizacji względem miejsca pożaru badanej substancji. W trakcie badań pożarów powierzchniowych spalany był etanol techniczny, benzyna Pb95 i olej napędowy, natomiast w przypadku pożarów strumieniowych gaz propan. Stanowiska badawcze zostały tak zaprojektowane i wykonane, by ich eksploatacja nie powodowała pogorszenia stanu środowiska przyrodniczego oraz nie oddziaływała na obszar Natura 2000 Ostoja Kozienicka PLB140013, w sąsiedztwie którego znajduje się poligon Ośrodka Szkolenia w Pionkach. Zabezpieczenia techniczne stanowisk badawczych oraz wdrożone w Państwowej Straży Pożarnej środki organizacyjno-proceduralne zapewniły podczas badań ochronę gruntu/powierzchni ziemi, wód gruntowych oraz wód podziemnych przed negatywnym oddziaływaniem produktów ropopochodnych oraz wód gaśniczych.

2. Badanie pożarów powierzchniowych

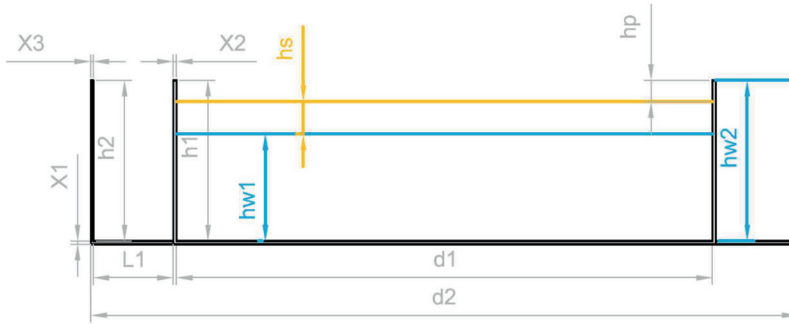
Badania pożarów powierzchniowych (zrealizowane w ramach projektu EVARIS) przeprowadzono na stanowisku badawczym (ryc. 1) – tacy o średnicy 1 m.



Ryc. 1. Stanowisko do badania pożarów powierzchniowych posadowione na płycie żelbetowej
Źródło: opracowanie własne.

W dalszej części rozdziału autorzy omówią przebieg i wyniki badań pożarów powierzchniowych przeprowadzonych na stanowisku badawczym. Na ryc. 2 przedstawiono rysunek techniczny tacy badawczej o średnicy 1 m, natomiast w tabeli 1 jej parametry. W celu zabezpieczenia tacy badawczej przed bezpośrednim oddziały-

waniem płomienia, ciecz badaną (z wyjątkiem etanolu), tzn. benzynę Pb95 i olej napędowy, rozlano na powierzchni wody. W celu dodatkowego chłodzenia tacy, wokół jej komory badawczej (wewnętrznej, w której umieszczono substancję badaną) znajdowała się komora (w kształcie pierścienia) wypełniona wodą (ryc. 2).



Ryc. 2. Wymiary tacy badawczej o średnicy 1 m

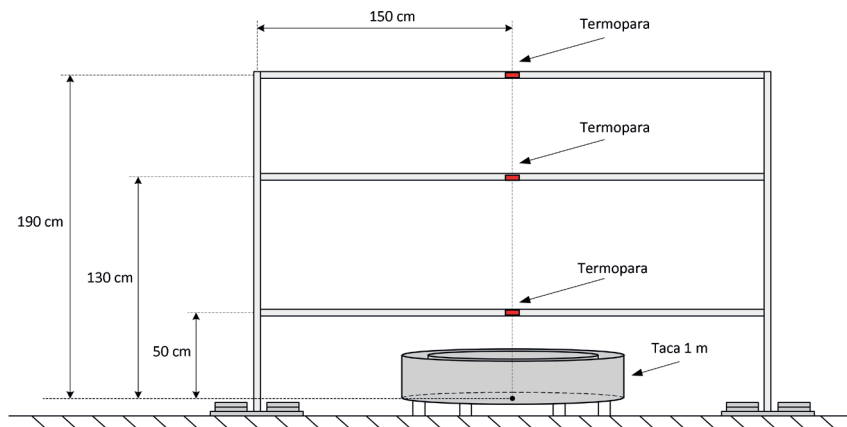
Źródło: opracowanie własne.

Tabela 1. Parametry tacy badawczej o średnicy 1 m

SYMBOL	OPIS	JEDNOSTKA	WARTOŚĆ
d1	Średnica wewnętrzna	[mm]	1000
d2	Średnica zewnętrzna	[mm]	1320
L1	Szerokość pierścienia chłodzącego	[mm]	150
hw1	Wysokość słupa wody w tacy	[mm]	200
hw2	Wysokość słupa wody w pierścieniu	[mm]	240
h1	Wysokość ścianki wewnętrznej	[mm]	250
h2	Wysokość ścianki zewnętrznej	[mm]	250
hs	Wysokość substancji badanej	[mm]	*
hp	Wysokość pustej przestrzeni	[mm]	*
X1	Grubość dna	[mm]	6
X2	Grubość ścianki wewnętrznej	[mm]	4
X3	Grubość ścianki zewnętrznej	[mm]	4
V1	Objętość tacy	[m ³]	0,196
Vs	Objętość substancji badanej	[m ³]	*
mt	Masa tacy	[kg]	37,79
mw	Masa wody	[kg]	300,78
mc	Masa całkowita bez substancji badanej	[kg]	338,57
h3	Wysokość dna tacy nad ziemią	[mm]	500

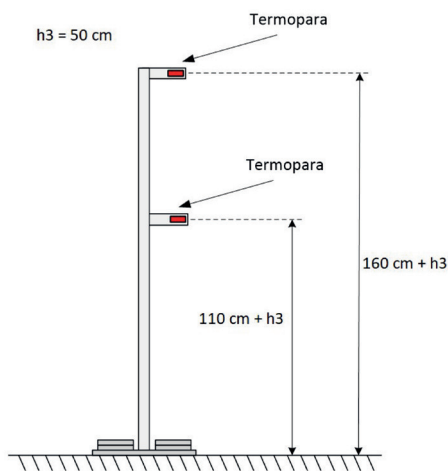
* Wartości zależne od ilości zastosowanej do badania substancji niebezpiecznej

Źródło: opracowanie własne.



Ryc. 4. Schemat konstrukcyjny stojaka na termopary umieszczone nad środkiem tacy badawczej

Źródło: opracowanie własne.

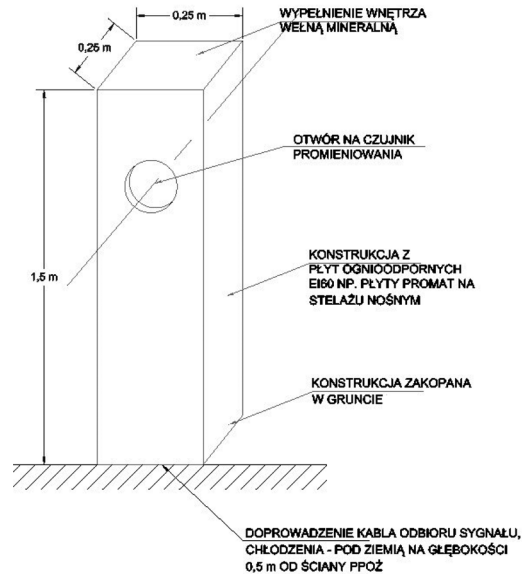


Ryc. 5. Schemat konstrukcyjny stojaków przeznaczonych do mocowania termopar

Źródło: opracowanie własne.

Do pomiaru promieniowania ciepłego wykorzystano cztery czujniki promieniowania typu SBG01 (Schmidta-Boeltera), w tym jeden czujnik o zakresie roboczym do 10 kW/m^2 , dwa czujniki o zakresie roboczym do 50 kW/m^2 oraz jeden czujnik o zakresie roboczym do 100 kW/m^2 . Czujniki promieniowania ciepłego typu SBG01 wymagają chłodzenia w postaci przepływu (co najmniej 30 l/h) wody o ciśnieniu w zakresie od 3 bar do 5 bar. Układ chłodzenia czujnika promieniowania ciepłego zbudowano w tzw. obiegu zamkniętym, z wykorzystaniem zbiornika (o pojemności 20 dm^3) na ciecz chłodzącą (wodę) oraz pompy zanurzeniowej

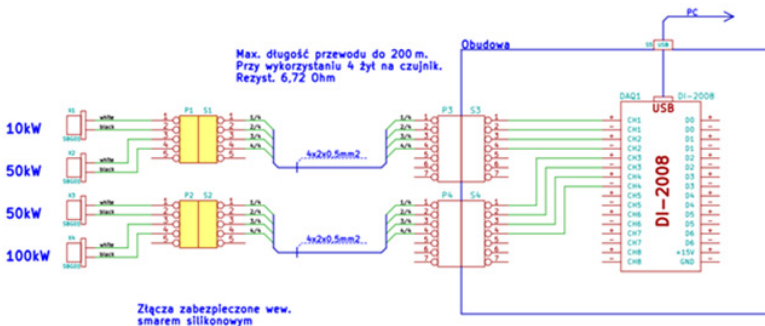
(posiadającej zdolność dostarczenia i podtrzymania wymaganego ciśnienia wody w obiegu), które wraz z czujnikiem umieszczono w specjalnie wykonanej do tego celu obudowie wykonanej z płyty ognioodpornej (ryc. 6).



Ryc. 6. Schemat konstrukcyjny obudowy czujnika promieniowania ciepłego i wodnego układu chodzenia

Źródło: opracowanie własne.

Podczas badań pożarów powierzchniowych wykorzystano łącznie: 15 szt. termopar (12 typu „K” i 3 typu „N” klasy 1 wg PN-EN 60584-2), 4 czujniki promieniowania ciepłego, modułu akwizycji danych DATAQ Di-2008 i komputera. Schemat elektryczny układu pomiarowego promieniowania ciepłego przedstawiono na ryc. 7.



Ryc. 7. Schemat elektryczny układu pomiarowego promieniowania ciepłego

Źródło: opracowanie własne.

W tabeli 2 zestawiono warunki brzegowe w momencie zapłonu poszczególnych badanych w tacy cieczy.

Tabela 2. Warunki początkowe badań pożarów powierzchniowych w tacy o średnicy 1 m

CIECZ	ILOŚĆ [L]	WARSTWA SUBSTANCJI PALNEJ [CM]	KIERUNEK WIATRU	PRĘDKOŚĆ WIATRU [M/S]	TEMPERATURA [°C]	WILGOTNOŚĆ [%]	CIŚNIENIE [HPA]	ZACHMURZENIE
Olej napędowy	9	1,2	SE/S	0	26	60	1017,0	BRAK
Benzyna Pb95	9	1,2	NE	0,9	28	52	1017,9	BRAK
Etanol techniczny	9	1,2	NE/E	0,4	31	46	1017,4	NISKIE

Źródło: opracowanie własne.

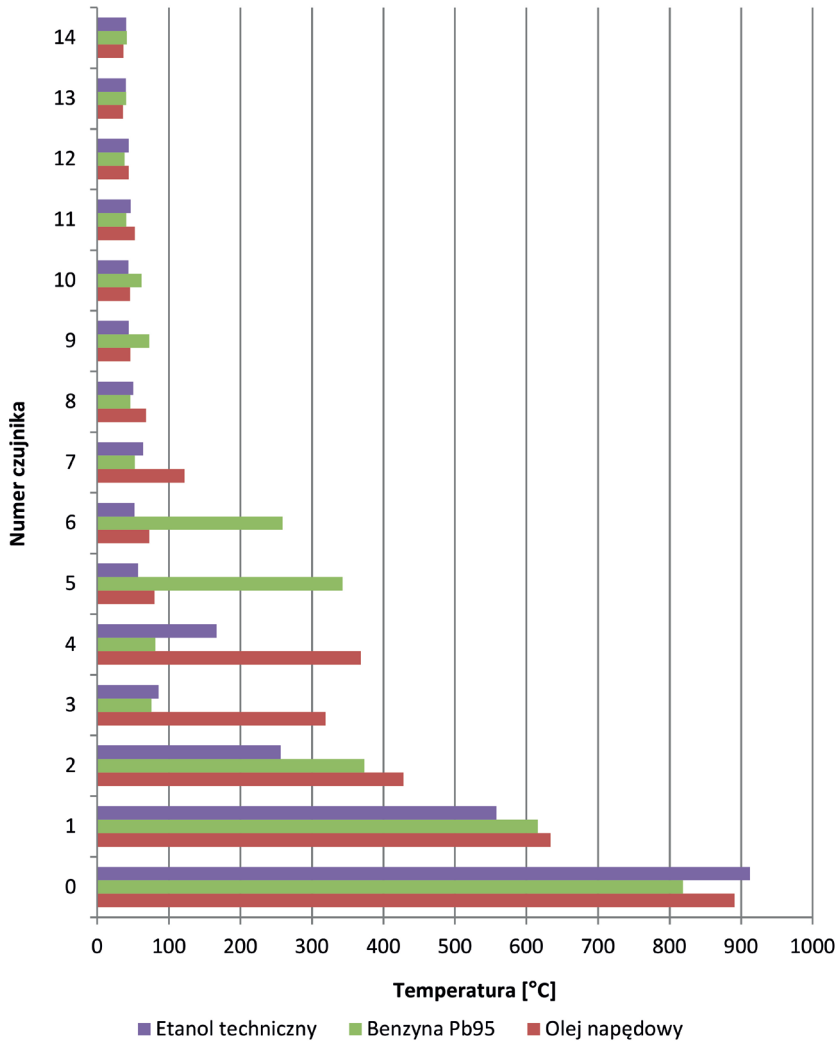
W tabeli 3 zestawiono najwyższe wartości temperatur zarejestrowane na czujnikach (ryc. 3) dla poszczególnych cieczy w tacy o średnicy 1 m.

Tabela 3. Wyniki pomiarów temperatury

BADANA SUBSTANCJA	OLEJ NAPĘDOWY														
	Nr termopary	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Wartość temp. [°C]	891,0	633,6	427,6	319,1	368,2	79,7	72,5	122,0	67,7	46,3	45,8	52,6	43,8	35,5	36,3
BADANA SUBSTANCJA	BENZYNA PB95														
	Nr termopary	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Wartość temp. [°C]	818,6	615,8	373,1	75,5	81,1	343,1	259,4	52,5	46,2	72,7	61,5	40,4	38,3	40,0	41,4
BADANA SUBSTANCJA	ETANOL TECHNICZNY														
	Nr termopary	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Wartość temp. [°C]	912,2	557,9	256,3	85,4	166,7	57,2	52,0	64,1	50,4	43,6	43,1	46,4	43,7	39,8	40,0

Źródło: opracowanie własne.

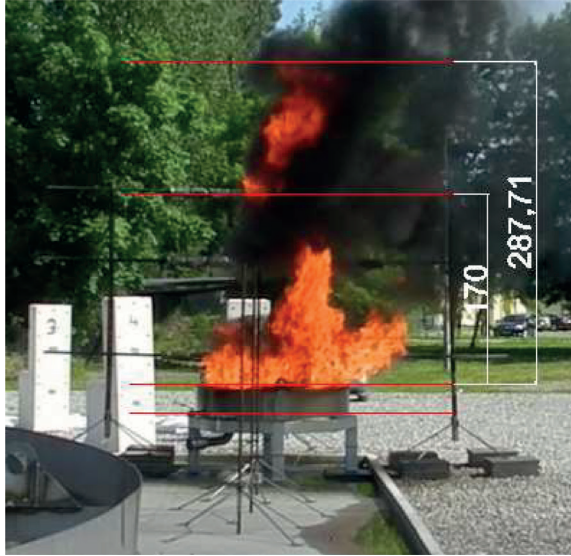
Na ryc. 8 przedstawiono zestawienie najwyższych wartości temperatur zarejestrowanych odpowiednio dla oleju napędowego, benzyny Pb95 i etanolu technicznego.



Ryc. 8. Rozkład temperatury podczas badania pożarów powierzchniowych

Źródło: opracowanie własne.

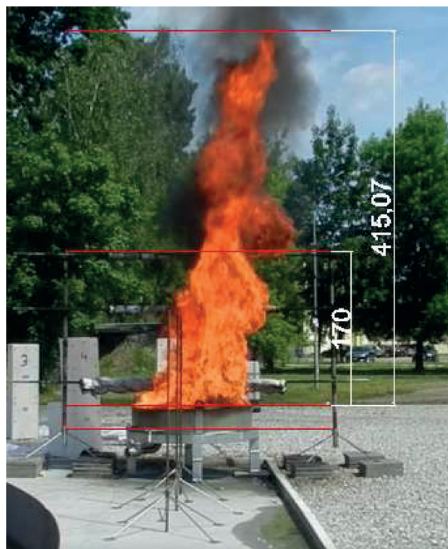
Na podstawie zapisów wideo i ustawionych w pobliżu płomienia stojaków z zaznaczonymi podziałkami wymiarów dokonano oszacowania rozmiarów płomienia. Na ryc. od 9 do 11 przedstawiono zdjęcia z przykładowego pomiaru wysokości płomienia odpowiednio dla oleju napędowego, benzyny Pb95 oraz etanolu technicznego.



Ryc. 9. Sposób określenia wysokości płomienia – ciecz: olej napędowy

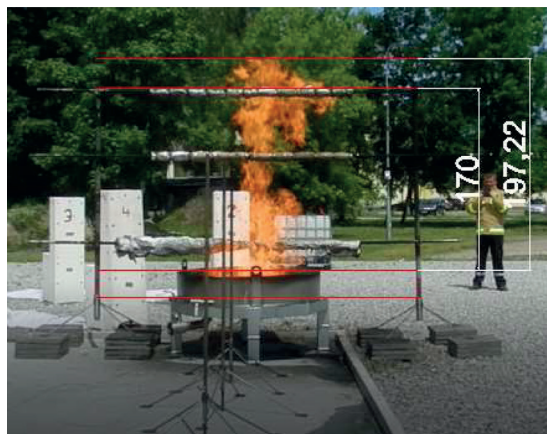
Źródło: opracowanie własne.

W końcowej fazie wypalania oleju napędowego występowało zjawisko gwałtownego parowania wody znajdującej się pod warstwą paliwa, przez co pojawił się efekt wzmożonego spalania i wzrost wysokości płomienia. Proces ten był jednak na tyle krótkotrwały, że odparowaniu ulegała dwumilimetrowa warstwa wody.



Ryc. 10. Sposób określenia wysokości płomienia – ciecz: benzyna Pb95

Źródło: opracowanie własne.



Ryc. 11. Sposób określenia wysokości płomienia – ciecz: etanol techniczny

Źródło: opracowanie własne.

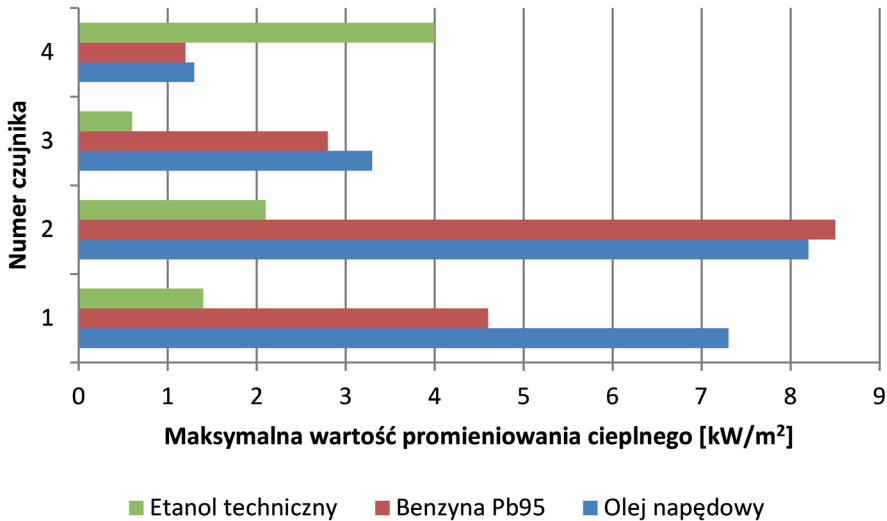
W przypadku spalania etanolu po początkowym spalaniu na całej powierzchni tacy dochodziło do deformacji dna i ciecz spływała w pobliże brzegów tacy. Dalej wypalała się w postaci pierścienia. W pomiarze wysokości płomienia uwzględniono brak 24-centymetrowej warstwy chłodziwa w postaci wody. Zestawienie wyników badań wszystkich substancji niebezpiecznych (piki promieniowania cieplnego zarejestrowane na czujnikach od 1 do 4, wysokość płomienia oraz czas spalania) zaprezentowano w tabeli 4.

Tabela 4. Wyniki pomiarów promieniowania cieplnego, wysokości płomienia i czasu spalania

BADANA SUBSTANCJA	NR CZUJNIKA PROMIENIOWANIA CIEPLNEGO	MAKSYMALNA WARTOŚĆ PROMIENIOWANIA CIEPLNEGO [kW/m ²]	WYSOKOŚĆ PŁOMIENIA [m]	CZAS SPALANIA [min:s]
Olej napędowy	1	7,3	2,87	6:13
	2	8,2		
	3	3,3		
	4	1,3		
Benzyna Pb95	1	4,6	4,15	3:52
	2	8,5		
	3	2,8		
	4	1,2		
Etanol techniczny	1	1,4	2,17	14:29
	2	2,1		
	3	0,6		
	4	4,0		

Źródło: opracowanie własne.

Na ryc. 12 zamieszczono dane odnoszące się do zarejestrowanej odpowiednio dla oleju napędowego, benzyny Pb95 i etanolu technicznego maksymalnej wartości promieniowania cieplnego odnotowanego przez poszczególne czujniki.

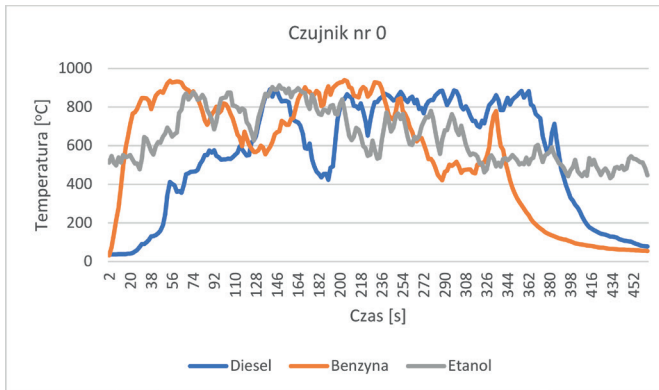


Ryc. 12. Rozkład maksymalnego promieniowania cieplnego podczas badania pożarów powierzchniowych

Źródło: opracowanie własne.

W ramach badań pożarów powierzchniowych przeprowadzono łącznie 3 testy, po jednym na każdej z trzech substancji palnych (oleju napędowym, benzynie Pb95 oraz etanolu technicznego), w tacy o średnicy wewnętrznej 1 m. W przypadku pomiaru temperatury przy pomocy punktowych termopar na odczyty duży wpływ miały ruchy powietrza, które powodowały kierunkowanie płomieni. Stąd najwyższe odczyty zawsze odnotowywano przy bezpośrednim oddziaływaniu płomienia na czujniki (znajdujące się w najbliższej odległości od płomienia). Najwyższe zmierzone wartości temperatury (tzw. piki), jakie generował płomień poszczególnych cieczy, zarejestrowano na termoparach nr 0–2 (znajdujących się bezpośrednio nad tacy). W przypadku termopar nr 3–14 (zlokalizowanych poza tacy) najwyższe wartości temperatur zarejestrowano w momencie oddziaływania na nie płomienia ukierunkowanego przez wiatr.

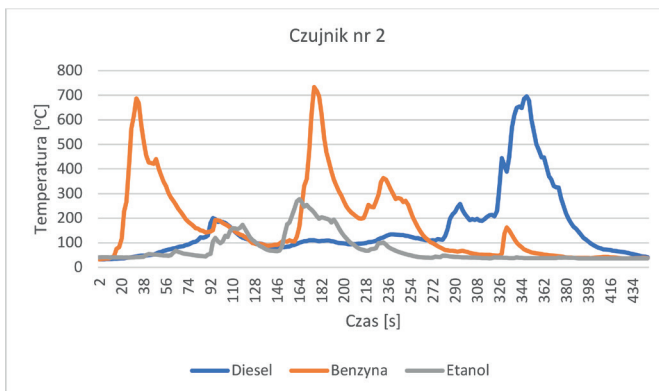
Z analizy danych ujętych na wykresie (ryc. 13) można wywnioskować, że rejestrowana temperatura w czasie ma trend liniowy dla czujnika nr 0 (znajdującego się na wysokości 0,5 m nad dnem tacy – ryc. 3), gdzie ruchy powietrza nie mają dużego znaczenia. Zebrane dane pozwalają dostrzec stopniowy wzrost temperatury na czujniku nr 0 podczas badania oleju napędowego, co było wynikiem powolnego procesu jego rozpalania.



Ryc. 13. Wykres rejestrowanej temperatury dla czujnika nr 0 podczas badań pożarów powierzchniowych na tacy o średnicy 1 m

Źródło: opracowanie własne.

Na wykresie (ryc. 14) przedstawiono wyniki rejestrowanych temperatur na czujniku nr 2 (znajdującym się na wysokości 1,9 m nad dnem tacy – ryc. 3). Najwyższe zarejestrowane wartości temperatur (tzw. piki) występowały w chwilach bezpośredniego oddziaływania płomienia na czujnik – termoparę. Najwyższe wartości zarejestrowanych temperatur odnotowano na termoparze nr 2 przy spalaniu benzyny, w związku z tym, że płomień spalania tej substancji był najwyższy. Gwałtowny wzrost wartości temperatury zarejestrowany na czujniku nr 2 (ryc. 14) pod koniec spalania oleju napędowego związany był z unoszeniem przez parę wodną cząsteczek oleju napędowego.



Ryc. 14. Wykres rejestrowanej temperatury dla czujnika nr 2 podczas badań pożarów powierzchniowych na tacy o średnicy 1 m

Źródło: opracowanie własne.

Termopary nr 0–2 (znajdujące się nad tacą) oraz termopary nr 3–6, usytuowane najbliżej niej na wysokości 1,1 m i 1,6 m – pierwszy stojak pomiarowy – rejestrowały najwyższe temperatury podczas podmuchu wiatru (z uwagi na zmianę zasięgu płomienia). Na dalszych punktach pomiarowych odnotowano temperatury znacznie poniżej 100°C, a na ostatnich wzrost temperatury był niewielki. Najszybciej wypaleniu ulegała benzyna, następnie olej napędowy, a najwolniej spalał się etanol. W przypadku etanolu odnotowano również najmniejszą ilość wydzielanego pod wpływem pożaru dymu. Najwyższe płomienie obserwowano podczas spalania benzyny, a najniższe podczas spalania etanolu.

W trakcie pomiarów obserwowano również silną zależność promieniowania ciepłego od prędkości oraz kierunku wiatru. Wyższe wartości chwilowe rejestrowano, gdy wiatr oddziaływał w kierunku czujników. Odnotowano także wyższe wartości promieniowania ciepłego na czujnikach nr 1 i 2, znajdujących się w większej odległości od tacy niż czujnik nr 4 (odległości czujników promieniowania ciepłego względem krawędzi wewnętrznego pierścienia tacy 1 m prezentuje schemat przedstawiony na ryc. 3). Mogło być to spowodowane różnicą czułości tych czujników oraz ich zakresem pomiarowym. Czujniki nr 1 oraz 2 charakteryzowały się zakresem pomiarowym od 0 do 50 kW/m², a czujnik nr 4 od 0 do 100 kW/m². Najniższe wartości promieniowania ciepłego rejestrowano dla etanolu, a najwyższe dla benzyny. Wartości promieniowania ciepłego dla oleju napędowego były zbliżone do benzyny. Na uwagę zasługuje fakt, że wartości promieniowania ciepłego dla benzyny i oleju napędowego są ponad dwukrotnie wyższe niż dla etanolu, pomimo że temperatura spalania tych cieczy nie różni się w znacznym stopniu. Przyczyny tego stanu rzeczy należy upatrywać w charakterze spalania etanolu – spokojnym, zbliżonym do laminarnego, bez nośnika energii promieniowania w postaci dymu i turbulencji.

3. Badania pożaru strumieniowego

Stanowisko do badania pożarów strumieniowych (ryc. 15 i 16) – zbudowane na terenie Ośrodka Szkolenia w Pionkach Komendy Wojewódzkiej Państwowej Straży Pożarnej w Warszawie – umożliwia symulację zdarzeń przy wyciekach skrajnie łatwopalnych gazów, uwalnianych pod ciśnieniem z aparatury procesowej. W skład stanowiska do badania pożarów strumieniowych wchodzi zbiornik naziemny o pojemności 4,85 m³, elektryczny podgrzewacz o wydajności 200 kg/h (80 m³/h), gazomierz (przeznaczony do pomiaru objętości gazu wydobywającego się z instalacji) oraz rurociąg zakończony dyszą pozwalającą na tzw. wolny wypływ gazu. Schemat konstrukcyjny instalacji gazowej przedstawiono na ryc. 17. Instalacja gazowa zapewnia możliwość regulacji uwalniania gazu oraz jego stanu – od wycieku fazy gazowej przez wypływy dwufazowe do uwolnień fazy ciekłej. W niniejszym rozdziale autorzy przedstawiają wyniki pomiarów temperatur i promieniowania ciepł-

nego spalania propanu w fazie gazowej. Instalacja gazowa (ryc. 15 i 16) zabezpieczona została przy pomocy ścian (o wysokości 3 m) osłonowych (zabezpieczających naziemny zbiornik ciśnieniowy, elektryczny podgrzewacz oraz układ pomiarowy z akwizycją danych).



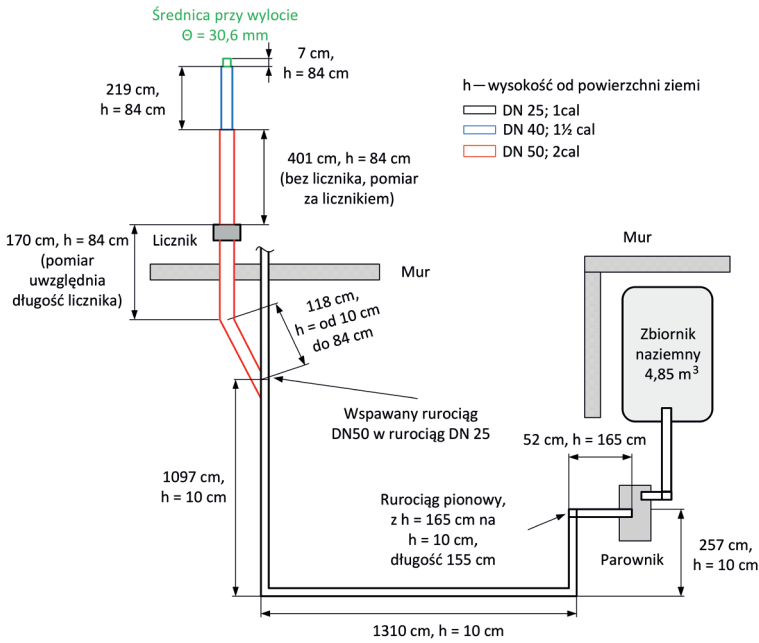
Ryc. 15. Stanowisko do badania pożarów strumieniowych (w tym parownik elektryczny o wydajności 200 kg/h (80 m³/h) i zbiornik naziemny 4,85 m³)

Źródło: opracowanie własne.



Ryc. 16. Stanowisko do badania pożarów strumieniowych (zakończenie rurociągu z zamontowanym gazomierzem przeznaczonym do pomiaru objętości gazu o natężeniu przepływu do 70 m³/h)

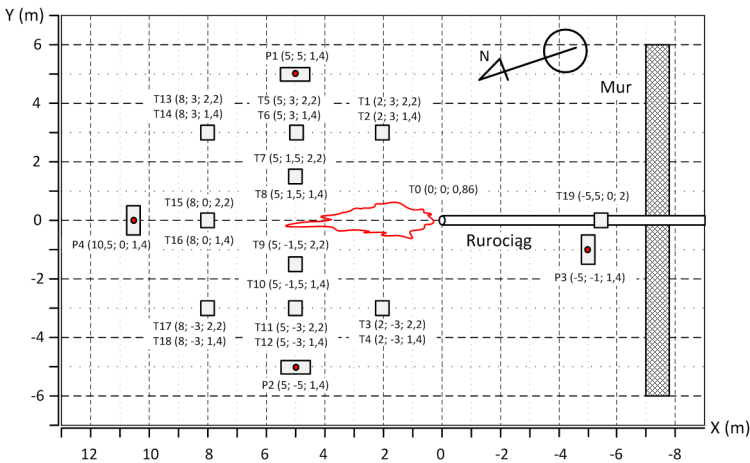
Źródło: opracowanie własne.



Ryc. 17. Schemat instalacji gazowej zbudowanej na terenie Ośrodka Szkolenia w Pionkach

Źródło: opracowanie własne.

Schemat rozmieszczenia czujników temperatury i promieniowania ciepłego na stanowisku do badania pożarów strumieniowych przedstawiono na ryc. 18.



T – termopara, P – czujnik promieniowania ciepłego

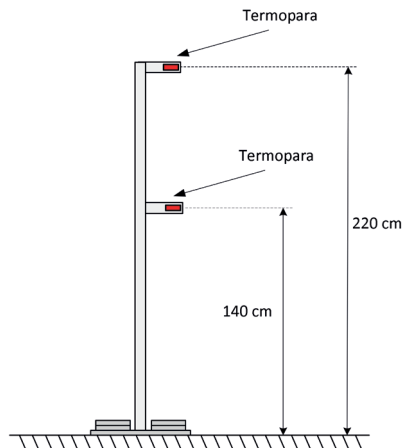
Ryc. 18. Schemat rozmieszczenia czujników pomiarowych na poligonowym stanowisku do badania pożarów strumieniowych

Źródło: opracowanie własne.

Przykład zastosowanego oznaczenia na ryc. 18:

P4 (10,5; 0; 1,4) – czujnik promieniowania cieplnego nr 4; liczby o wartościach 10,5 i 0 to współrzędne (wyrażone w metrach) odpowiednio dla osi odciętych (X) i osi rzędnych (Y) układu kartezjańskiego przyjętego na ryc. 18 do przedstawienia lokalizacji czujników pomiarowych stanowiska badawczego. Za początek układu współrzędnych przyjęto miejsce lokalizacji dyszy wylotowej z instalacji gazowej. Wysokość zamontowania czujnika nr 4 promieniowania cieplnego wynosi dla przedstawionego przykładu 1,4 m.

Czujniki do pomiaru temperatury (termopary) zamontowano przy wykorzystaniu stojaków ze stali żaroodpornej (ryc. 19) na wysokościach 1,4 m i 2,2 m nad powierzchnią ziemi. Sposób montażu czujników promieniowania cieplnego typu SBG01 jest zgodny z tym przedstawionym w opisie stanowiska do badania pożarów powierzchniowych (patrz ryc. 6). Podczas badań pożarów strumieniowych wykorzystano łącznie 20 szt. termopar (typu „K” i „N”) i 4 czujniki promieniowania cieplnego. W skład układu pomiarowego temperatur wchodzi termopary zamontowane na stojakach, moduł wejść NI-9214, kontroler NI cDAQ-9174 oraz przenośny komputer wraz z oprogramowaniem SignalExpress. Układ pomiarowy promieniowania cieplnego składa się z czujników pomiarowych wraz z wodnymi układami chłodzenia, modułu akwizycji danych DATAQ DI-2008 oraz przenośnego komputera z oprogramowaniem WINdaq. Szczegółowy opis układów pomiarowych przedstawiono w rozdziale pt. „Pomiary promieniowania cieplnego i temperatury pożarów rozlewisk cieczy oraz pożarów strumieniowych – założenia koncepcyjne do badań w dużej skali” niniejszej monografii. Podczas badań układ pomiaru temperatury rejestrował wyniki pomiaru temperatury z częstotliwością 2 Hz, natomiast układ pomiaru promieniowania cieplnego z częstotliwością 5 Hz.



Ryc. 19. Schemat konstrukcyjny stojaków przeznaczonych do mocowania termopar

Źródło: opracowanie własne.

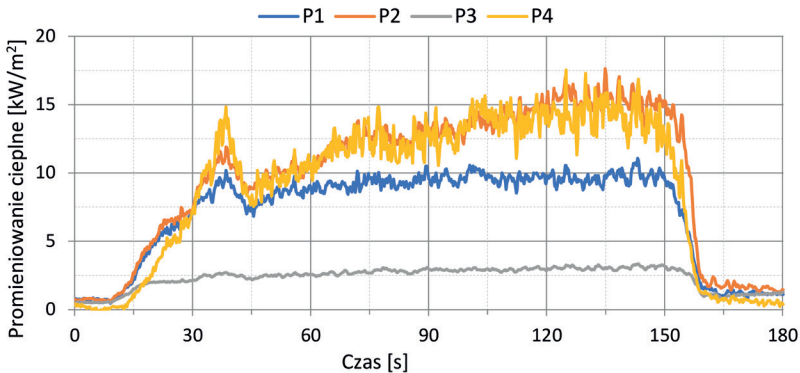
Na ryc. 20 przedstawiono stanowisko do pomiaru temperatur i promieniowań ciepłych płomienia spalania propanu w fazie gazowej.



Ryc. 20. Stanowisko pomiarowe do badań pożarów strumieniowych

Źródło: opracowanie własne.

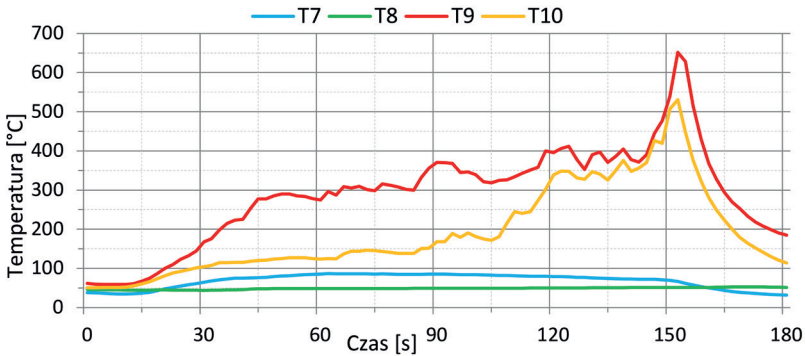
Na ryc. 21 przedstawiono wykresy zmian wartości promieniowań ciepłych zarejestrowanych podczas badania na czujnikach P1, P2, P3 i P4 (ryc. 18) w funkcji czasu.



Ryc. 21. Wykresy zmian wartości promieniowań ciepłych w funkcji czasu

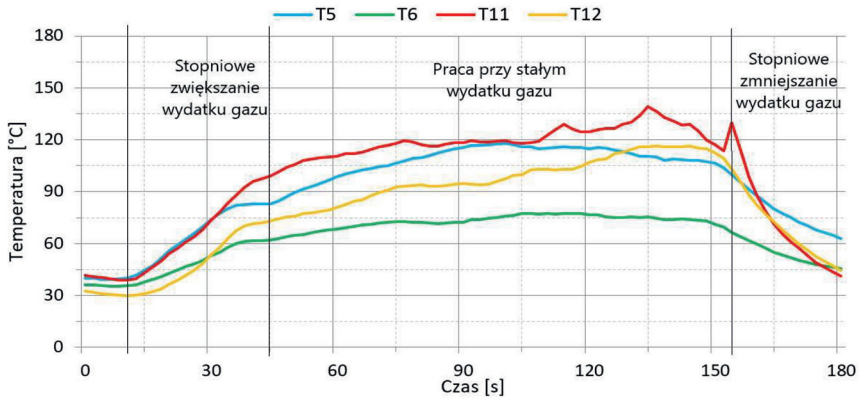
Źródło: opracowanie własne.

Ryc. 22–27 ilustrują wykresy zmian wartości temperatur zarejestrowanych na termoparach (rozmieszczonych na stanowisku zgodnie z ryc. 18) w funkcji czasu.



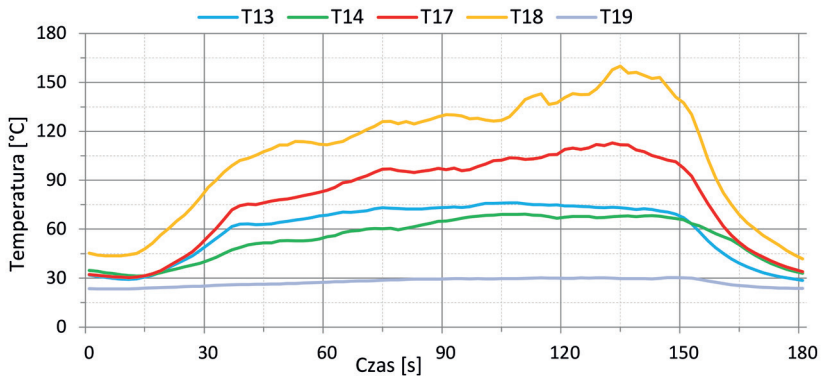
Ryc. 22. Wykresy zmian wartości temperatur na termoparach T7, T8, T9 i T10 w funkcji czasu

Źródło: opracowanie własne.



Ryc. 23. Wykresy zmian temperatur na termoparach T5, T6, T11 i T12 w funkcji czasu

Źródło: opracowanie własne.

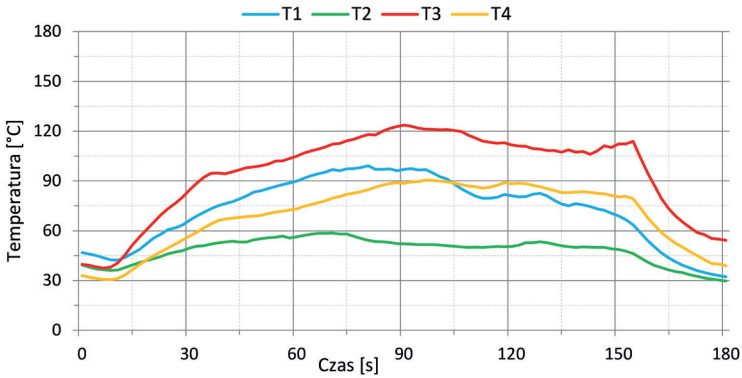


Ryc. 24. Wykresy zmian temperatur na termoparach T13, T14, T17, T18 i T19 w funkcji czasu

Źródło: opracowanie własne.

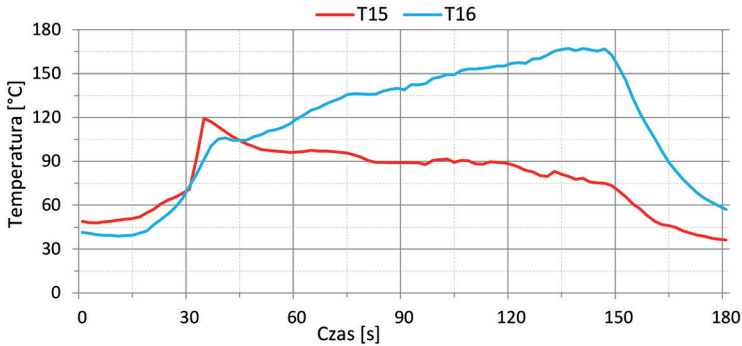
ROZDZIAŁ II

Badania pożarów powierzchniowych i strumieniowych w dużej skali



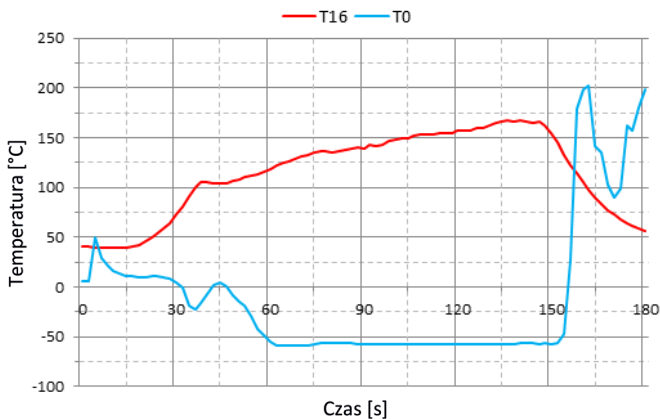
Ryc. 25. Wykresy zmian temperatur na termoparach T1, T2, T3 i T4 w funkcji czasu

Źródło: opracowanie własne.



Ryc. 26. Wykresy zmian temperatur na termoparach T15 i T16 w funkcji czasu

Źródło: opracowanie własne.



Ryc. 27. Wykresy zmian temperatur na termoparach T0 i T16 w funkcji czasu

Źródło: opracowanie własne.

Operator instalacji gazowej za pomocą ręcznego zaworu ustawiał niewielki wydatek gazu (propan) wydobywającego się z dyszy instalacji gazowej, który pozwalał na bezpieczne jego podpalenie. Następnie stopniowo zwiększano wydatek gazu do wartości, które przedstawiono w tabeli 5.

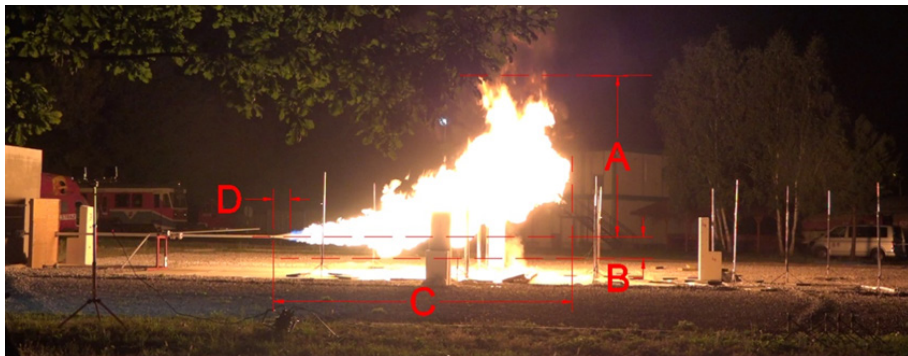
Tabela 5. Wydatek gazu podczas badania pożaru strumieniowego

WYDATEK GAZU		
[m ³ /s]	[m ³ /min]	[m ³ /h]
0,091	5,467	328,000

Źródło: opracowanie własne.

Wydatek gazu zmierzony został przy pomocy gazomierza (ryc. 16) jako średnia w czasie ustalonego stanu pracy (przy stałym nastawie wydatku gazu) instalacji gazowej, który trwał od 45 s do 155 s (ryc. 23). Stan stopniowego zwiększania wydatku gazu trwał od 10 s do 45 s, natomiast zamykanie zaworu od 155 s do 180 s (ryc. 23).

W trakcie badań obserwowano wzrost wymiarów płomienia spalania gazu propan wraz ze zwiększaniem wydatku gazu. Na podstawie zapisów wideo i ustawionych w pobliżu płomienia stojaków z zaznaczonymi podziałkami wymiarów, dokonano oszacowania rozmiarów płomienia. Na ryc. 28 przedstawiono zdjęcie płomienia (zarejestrowane przy stałym nastawie wydatku gazu wynoszącym 328 m³/h) wraz z naniesionym opisem poszczególnych jego wymiarów. W tabeli 6 przedstawiono wymiary płomienia, zgodnie z oznaczeniem przyjętym na ryc. 28. Podczas spalania gazu (propan) tworzył się poziomo ukierunkowany płomień, który wraz ze wzrostem odległości od dyszy palnika kierował się ku górze (ryc. 28).



A – wysokość płomienia od osi rurociągu w górę, B – wysokość płomienia od osi rurociągu w dół, C – długość płomienia, D – odległość od dyszy do płomienia (strefa mieszania się gazu i powietrza)

Ryc. 28. Zdjęcie płomienia spalania gazu propan wydobywającego się z dyszy stanowiska do badania pożarów strumieniowych

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 6. Wymiary płomienia spalania gazu propan, przy stałym nastawie wydatku gazu

A [m]	B [m]	C [m]	D [m]
4,2	0,45	8,2	0,75

Źródło: opracowanie własne.

W stanie ustalonym pracy instalacji gazowej (przy stałym nastawie wydatku gazu) długość odcinka strumienia gazu, w którym gaz nie ulegał jeszcze spalaniu (obszar mieszania się gazu z powietrzem) wynosił około 0,75 m (ryc. 28).

W trakcie badań monitorowano warunki pogodowe (temperaturę, kierunek i prędkość wiatru) przy pomocy stacji pogodowej, a uzyskane dane meteorologiczne rejestrowano. Badania pożarów strumieniowych przeprowadzono w porze wieczornej i nocnej, co umożliwiło prace w stabilnych warunkach pogodowych przy prędkości wiatru nieprzekraczającej 0,2 m/s. W trakcie badań zaobserwowano znaczący wpływ północnego kierunku wiatru (o prędkości 0,1 m/s) na wartości rejestrowanych promieniowań cieplnych (ryc. 21) przez symetrycznie ustawione (względem osi dyszy) czujniki P1 i P2, a także wartości rejestrowanych temperatur przez symetrycznie ustawione termopary (ryc. 22–25).

Wyniki zarejestrowanych podczas badania warunków pogodowych wykazały niewielką zmianę prędkości wiatru z 0,1 m/s na 0,2 m/s, przy stałym północnym kierunku wiatru. Wpływ zmiany parametrów wiatru, która nastąpiła w około 140 s badania, można zaobserwować na wykresach rejestrowanych temperatur. Przykładowo, wartości rejestrowanej temperatury na termoparze T9 (ryc. 22) wzrastają z około 350°C do ponad 600°C, natomiast umocowana po przeciwnej stronie termopara T7 zarejestrowała w tym czasie niewielki spadek wartości temperatury. Było to spowodowane nieznacznym odchyleniem płomienia w kierunku zawietrznej, i tym samym płomień zbliżył się do czujnika T9 a oddalił od czujnika T7. Można z tego wywnioskować, że nawet wiatr o bardzo małych wartościach (od 0,1 m/s do 0,2 m/s) jest w stanie przesunąć oś płomienia w kierunku zawietrznej.

Wartości pomiaru temperatury rejestrowanej na termoparze T0 (umieszczonej na końcu dyszy wylotowej) przedstawiono na ryc. 27. Wraz ze wzrostem wydatku gazu z instalacji gazowej następował spadek wartości temperatury rejestrowanych przez czujnik T0. Było to spowodowane przez efekt zamarzania pary wodnej obecnej w powietrzu, wskutek spadku temperatury armatury gazowej, powodowanego odbieraniem ciepła na rozprężanie gazu palnego. W trakcie stopniowego zamykania zaworu (ograniczania wydatku gazu) następował wzrost wartości temperatury rejestrowanych przez czujnik T0 – spowodowane to było zbliżaniem się płomienia do dyszy, i tym samym czujnika T0. Minimalna zarejestrowana przez czujnik T0 temperatura wynosiła około -60°C. W badaniach wykorzystano termoparę typu „N” posiadającą zakres pomiarowy od -40°C do +1250°C. Wartość minimalna (-60°C) stanowiła najniższą wartość, jaką termopara T0 była w stanie zmierzyć.

ROZDZIAŁ III.

**MODELOWANIE MATEMATYCZNE
POŻARÓW POWIERZCHNIOWYCH
METODĄ OBLICZENIOWEJ
MECHANIKI PŁYNÓW**

Robert Cherbański, Leszek Rudniak,
Piotr Machniewski, Eugeniusz Molga

*Politechnika Warszawska
Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej*

1. Wprowadzenie

Istnieje wiele przykładów dramatycznych w skutkach pożarów, które miały miejsce w przeszłości, np. pożar supermarketu Innovation w Brukseli w 1967 r., w którym zginęło 251 osób, a 62 było rannych, czy pożar w klubie Cinq Sept w Saint-Laurent-du-Pont we Francji w 1970 r., w którym 146 osób poniosło śmierć¹.

W Polsce w latach 2006–2010 odnotowano rocznie ok. 4,05 pożarów w przeliczeniu na tysiąc mieszkańców, co stanowi prawie dwukrotnie większą wartość w porównaniu do średniej (2,46) dla grupy 40 państw respondentów (grupa państw współpracująca ze stowarzyszeniem Geneva Association)². W tym samym przedziale czasu w Polsce, w wyniku pożarów śmierć poniosło przeciętnie 1,52 osób (w przeliczeniu na 100 tys. mieszkańców), przy średniej 2,31 dla grupy 40 państw respondentów. W Polsce, w latach 2007–2010, wskaźnik liczby osób rannych wyniósł 8,87 (w przeliczeniu na 100 tys. mieszkańców) i jest on porównywalny ze wskaźnikiem dla 40 państw respondentów, który w tym samym okresie wyniósł 7,73².

Chociaż liczba ofiar pożarów na świecie maleje każdego roku, to istnieje możliwość dalszej poprawy bezpieczeństwa z wykorzystaniem nowoczesnych technologii³. Ochrona przeciwpożarowa jest ważnym zagadnieniem w każdym obiekcie budowlanym. Jako przykład tego typu obiektów budowlanych można wymienić chemiczne instalacje przemysłowe, tunele, centra handlowe i biurowe, podziemne stacje metra i garaże. W tego rodzaju obiektach o złożonej geometrii istnieją dogodne warunki do rozprzestrzeniania się dymu i trujących substancji będących produktami spalania. Istotnym zagadnieniem jest przewidywanie pola temperatur oraz widoczności. Możliwość uzyskania tych informacji jest ważną okolicznością w opracowaniu odpowiednich scenariuszy związanych z ewakuacją ludzi przebywających w obiektach, w których analizowany jest przypadek pożaru⁴.

¹ L.G. Cajot, M. Haller, M. Pierre, Seminarium – *Projektowanie konstrukcji stalowych zespolonych z uwzględnieniem warunków pożarowych*, DIFISEK, Poznań 2008.

² P. Guzewski, D. Wróblewski, D. Małozieć, *Czerwona Księga Pożarów*, CNBOP-PIB, Józefów 2014, s. 90.

³ J. Tibbats, S. McCormick, A. Karanjkar, *Fire Modelling Using CFD: Smoke Management and the Improved Prediction of Visibility*, Materiały Firmy ANSYS Inc. (n.d.).

⁴ L.G. Cajot, M. Haller, M. Pierre, dz. cyt.; Y. Hasemi, S. Yokobayashi, T. Wakamatsu, A. Ptchelintsev, *Fire Safety of Building Components Exposed to a Localized Fire*, Proc. First Int. ASIAFLAM Conf., 1995, s. 351–361; Final Report CEC Agreement 7210 / SA210, *Development of Design Rules for Steel Structures Subjected to Natural Fires in Large Compartments*, 1997; N. Johansson, S. Svensson, P. van Hees, *An Evaluation of Two Methods to Predict Temperatures in Multi-Room Compartment Fires*, „Fire Safety Journal” 2015, 77, s. 46–58. doi:10.1016/j.firesaf.2015.07.006.

Charakterystyka rzeczywistego pożaru obejmuje następujące fazy:

1. Fazę bezpłomieniową – zapłon i pożar bezpłomieniowy w bardzo niskiej temperaturze, przy czym długość tej fazy jest często trudna do oszacowania.
2. Fazę rozwoju pożaru zwaną fazą przedrozgorzeniową (pożar zlokalizowany) – czas trwania tej fazy zależy głównie od charakterystyki strefy. Pożar pozostaje pożarem zlokalizowanym do chwili ewentualnego rozgorzenia.
3. Fazę rozgorzenia – rozgorzenie stanowi pożar uogólniony. Faza ta jest na ogół bardzo krótka.
4. Fazę po rozgorzeniu – etap ten odpowiada pożarowi uogólnionemu, którego czas trwania zależy od obciążenia ogniowego i warunków wentylacji.
5. Fazę zmniejszania się pożaru – pożar zaczyna słabnąć do chwili, gdy wszystkie palne materiały ulegną całkowitemu spalaniu.

Symulacje komputerowe w oparciu o metody CFD (ang. *Computational Fluid Dynamics*) mogą być bardzo cennym źródłem informacji o obciążeniach termicznych oraz zadymieniu związanym z pożarem, które ułatwiają ocenić ryzyko związane z rozwojem pożaru w danym obiekcie i jego lokalizacji.

Modelowanie pożarów technikami CFD jest jednak nadal sporym wyzwaniem z uwagi na złożoność zjawisk zachodzących w czasie pożaru i wymagania dużej mocy obliczeniowej, zwłaszcza gdy takie symulacje dotyczą scenariuszy, gdzie istotne jest odwzorowanie dynamiki pożarów w obiektach o dużej skali. Osobnym zagadnieniem jest dokładność przewidywań modeli matematycznych wykorzystywanych w takich symulacjach, która jest wynikiem kompromisu związanego z uproszczeniami pozwalającymi skrócić czas obliczeń. Typowym układem testowym jest pożar powierzchniowy paliwa ciekłego, które jest spalane na tacy pomiarowej.

Obliczenia CFD pożarów powierzchniowych były tematem kilku wcześniejszych prac. Schälke i in. przeprowadzili obliczenia CFD dla pożaru powierzchniowego n-heksanu na tacy pomiarowej o średnicy 5 cm⁵. Obliczenia wykonali przy pomocy komercyjnego pakietu ANSYS Fluent. Do modelowania burzliwości wykorzystano metodę LES (ang. *Large Eddy Simulation*) wraz z modelem lepkości podsiatkowej Smagorinsky'ego-Lilly. Do modelowania spalania wykorzystano funkcję gęstości prawdopodobieństwa oraz model typu flamelet. Uproszczony mechanizm spalania uwzględnił 20 związków chemicznych oraz 42 reakcje chemiczne. W rozważanym przypadku stwierdzono mały udział promieniowania cieplnego w generowanym strumieniu ciepła oraz niską emisyjność sadzy i dlatego sformułowany model matematyczny nie uwzględnił ani promieniowania cieplnego, ani produkcji sadzy. Do dyskretyzacji domeny obliczeniowej wykorzystano niestrukturalną siatkę heksahedralną składającą się z $2 \cdot 10^6$ elementów. Walidację modelu przeprowadzono na podstawie porównania wyników modelowania z osiowymi profilami

⁵ S. Schälke, K.D. Wehrstedt, M. Gawłowski, A. Schönbacher, *Validation of Submodels for CFD Simulation of N-Hexane Pool Flames Including Interferometry*, „Chemie-Ingenieur-Technik” 2012, 84, 4, s. 484–490. doi:10.1002/cite.201100179.

stężeń oraz promieniowymi profilami średnich temperatur na trzech różnych wysokościach nad powierzchnią cieczy. Porównanie wyników obliczeń i pomiarów w odniesieniu do stężeń pokazało, że średnie odchylenie kwadratowe wynosiło 6,4%. Porównanie temperatur obliczonych i zmierzonych interferometrycznie pokazało, że średnia różnica temperatur wyniosła $\Delta T \approx 13,5$ K.

Rengel i in. przeprowadzili obliczenia CFD pożarów powierzchniowych benzyny i diesla na tacach pomiarowych o średnicach 1,5 m, 3 m, 4 m, 5 m oraz 6 m⁶. Obliczenia wykonali w programie Fire Dynamics Simulator (FDS) i Flame Accelerator Simulator Fire (FLACS-Fire). Do modelowania burzliwości wykorzystano model k- ϵ (FLACS-Fire) oraz podejście LES z modelem podsiatkowej lepkości burzliwej Deardorffa. W obliczeniach uwzględniono odpowiednie modele odparowania benzyny i diesla. Spalanie opisywano za pomocą modelu Eddy Dissipation. W obliczeniach uwzględniono również prosty model powstawania sadzy przez przyjęcie stałych wartości współczynników konwersji paliwa do sadzy, jak i promieniowanie cieplne oraz siłę wiatru. Testowano siatki numeryczne o różnej liczbie elementów: 730000-2640000 (FDS) oraz 180000-1140000 (FLACS-Fire). Opracowany model matematyczny testowano przez porównanie wyników symulacji i badań doświadczalnych w odniesieniu do: temperatury płomienia, szybkości spalania, strumienia ciepła, wysokości i powierzchni płomienia oraz gęstości emitowanej mocy. Na tej podstawie oceniono silne i słabe strony testowanych programów.

Attar i in. wykonali obliczenia CFD pożarów powierzchniowych benzyny, ropy i nadtlenku (nadbzenoesan tert-butyłu, TBPB) w tacach pomiarowych o średnicach 0,06 m, 0,11 m oraz 0,18 m⁷. Symulacje numeryczne przeprowadzono w pakiecie ANSYS Fluent. Burzliwość była opisywana modelem Reynolds Stress (RSM) oraz metodą LES. Do opisu matematycznego spalania zastosowano model Eddy Dissipation. Do opisu wytwarzania sadzy w przebiegu pożaru wykorzystano model empiryczny Khana i Greevesa, zaś do modelowania radiacji cieplnej użyto modelu Discrete Ordinate (DO). Obliczenia prowadzono w geometrii trójwymiarowej. Domena obliczeniowa po dyskretyzacji zawierała około 315 000 elementów. Opracowany model matematyczny był oceniany na podstawie porównania wyników obliczeń numerycznych i doświadczalnych osiowych profili temperatur oraz intensywności promieniowania cieplnego obliczonego na podstawie danych doświadczalnych i modelowych.

Snegirev i in. przedstawili wyniki symulacji CFD pożarów powierzchniowych metanu i heptanu na tacach pomiarowych o średnicach odpowiednio 0,38 m i 0,3 m⁸.

⁶ B. Rengel, C. Mata, E. Pastor, J. Casal, E. Planas, *A Priori Validation of CFD Modelling of Hydrocarbon Pool Fires*, „Journal of Loss Prevention in the Process Industries” 2018, 56, s. 18–31. doi:10.1016/j.jlp.2018.08.002.

⁷ A.A. Attar, M. Pourmahdian, B. Anvaripour, *Experimental Study and CFD Simulation of Pool Fires*, „International Journal of Computer Applications” 2013, 70, s. 9–15. doi:10.5120/12004-5790.

⁸ A. Snegirev, E. Markus, E. Kuznetsov, J. Harris, T. Wu, *On Soot and Radiation Modeling in Buoyant Turbulent Diffusion Flames*, „Heat Mass Transfer” 2018, 54, s. 2275–2293. doi:10.1007/s00231-017-2198-x.

Obliczenia wykonano w pakiecie ANSYS Fluent. Burzliwość modelowano metodą LES z modelem podsiatkowej lepkości burzliwej Smagorinsky’ego-Lilly. Spalanie opisywano modelem Eddy Dissipation oraz modelem typu flamelet z mechanizmem reakcji uproszczonym do 29 związków chemicznych i 52 reakcji. Do opisu matematycznego promieniowania cieplnego wykorzystano model DO. Szczególną uwagę poświęcono opisowi matematycznemu formowania się sadzy. Porównano modele: jednoetapowy (Khan i Greeves), dwuetapowy (Tesner i in.) oraz model Moss-Brookesa w połączeniu z trzema modelami utleniania sadzy (Fenimore-Jones, Lee i in. oraz Magnussen-Hjertager). Model Moss-Brooks został rozszerzony o model utleniania sadzy i wykalibrowany dla heptanu.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie metodyki obliczeń CFD w odniesieniu do pożarów powierzchniowych benzyny i diesla. Praca ma bezpośredni związek z projektem pt. „Program do oceny ryzyka wystąpienia awarii w obiektach przemysłowych stwarzających zagrożenie poza swoim terenem” finansowanym przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju i realizowanym w ramach konsorcjum wspólnie z Centrum Naukowo-Badawczym Ochrony Przeciwpożarowej – Państwowym Instytutem Badawczym (lider), Narodowym Centrum Badań Jądrowych oraz firmą Bera Systems Sp. z o.o. Należy zauważyć, że większość prac prezentujących wyniki modelowania CFD pożarów powierzchniowych dotyczy małych tac pomiarowych o średnicach kilku bądź kilkudziesięciu centymetrów. W tym opracowaniu przedstawiono wynik obliczeń dla stosunkowo dużych tac o średnicach 1 m, 3 m i 6 m, co stanowi pewien wyróżnik. Obliczenia przeprowadzono przy użyciu pakietu ANSYS Fluent. Wyniki analiz CFD ukazano w postaci map z rozkładami prędkości i temperatur. Uzyskane wyniki zaprezentowano również w postaci osiowych profili temperatur i wysokości płomienia. Te ostatnie wyniki porównano z rezultatami innych obliczeń opartych o uproszczony model i korelacje.

2. Model CFD

Symulacja pożaru metodą CFD polega na numerycznym rozwiązaniu różniczkowych równań bilansowych: ciągłości, pędu, energii i składnika.

W celu symulacji pożarów powierzchniowych, przebiegających typowo w zakresie przepływu burzliwego, należy sformułować równania bilansowe: masy, pędu, składników i energii.

2.1 Bilans masy (równanie ciągłości)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

gdzie:

S_m – człon źródłowy w równaniu bilansu masy.

2.2 Bilans pędu

Równania bilansu pędu w formie wektorowej mają postać:

$$\frac{\partial(\rho\vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho\vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

gdzie:

p – ciśnienie statyczne,

$\bar{\tau}$ – tensor naprężeń zdefiniowany następująco:

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla\vec{v} + \nabla\vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (3)$$

gdzie:

μ – lepkość,

I – jednostkowy tensor,

$\rho\vec{g}$ i \vec{F} są siłami ciężkości oraz zewnętrznymi siłami masowymi.

Równanie (2) jest słuszne w zakresie przepływu laminarnego. W zakresie burzliwym konieczna jest modyfikacja powyższych równań. Aby uzyskać postać równań opisujących przepływ turbulentny, przyjmuje się zgodnie z hipotezą Reynoldsa, że chwilowe wartości wszystkich charakteryzujących ten przepływ wielkości fizycznych mogą być traktowane jako sumy wielkości średnich oraz odpowiednich wielkości fluktuacyjnych:

$$\eta = \bar{\eta} + \eta' \quad (4)$$

gdzie:

η – chwilowa wartość odpowiedniej zmiennej (u, v, w, p),

η' – wartość fluktuacyjna odpowiedniej zmiennej,

$\bar{\eta}$ – wartość średnia odpowiedniej zmiennej zdefiniowana:

$$\bar{\eta} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \eta dt \quad (5)$$

przy czym czas uśredniania Δt powinien być dostatecznie krótki, aby można było w nim pominąć zmiany wielkości średniej $\bar{\eta}$ a jednocześnie długi w stosunku do makroskali czasowej, charakteryzującej ruch największych w danym przepływie wirów.

Tak uśrednione równania ciągłości i bilansu pędu (Reynold's-Averaged Navier-Stokes equations, RANS) można przekształcić do postaci (notacja wskaźnikowa, uśrednione wartości zmiennej z pominięciem symbolu uśredniania):

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \rho g_i + \frac{\partial(-\rho \overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j} \quad (6)$$

Pojawia się w niej dodatkowy człon zawierający wielkość tensorową wyrażającą naprężenia Reynoldsa:

$$R_{ij} = \tau_{ij}^{RANS} = -\rho \overline{u'_i u'_j} \quad (7)$$

Zgodnie z hipotezą Boussinesqą mogą one być wyrażone przy pomocy lepkości burzliwej według następującej zależności:

$$R_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = 2\mu_t S_{ij} - \frac{2}{3}\mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} - \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij}; \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

gdzie:

μ_t jest lepkością burzliwą, którą można wyznaczyć przy pomocy modeli $k - \varepsilon$ lub $k - \omega$.

Dla dwuparametrowych modeli turbulencji lepkość burzliwa zdefiniowana jest zależnością:

$$\mu_t = C_D \frac{\rho k^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

Wielkości k i ε to odpowiednio kinetyczna energia turbulencji i dyssypacja kinetycznej energii turbulencji, które mogą być wyznaczone z następujących równań:

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t S^2 - \rho \varepsilon; \quad S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (10)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} \mu_t S^2 - \rho C_{2\varepsilon} \varepsilon) \quad (11)$$

gdzie:

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_{i\varepsilon}, C_{\varepsilon 2}$ są stałymi (najczęściej określonymi empirycznie).

W przypadku modelu $k - \omega$ energia kinetyczna burzliwości k oraz właściwa szybkość dyssypacji energii kinetycznej burzliwości ω są obliczane w wyniku rozwiązania równań bilansowych (model GEKO $k - \omega$)⁹:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = P_k - \rho C_\mu k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (12)$$

⁹ ANSYS Inc., ANSYS Fluent, Release 2019 R3, Help System, Canonsburg, PA 15317, 2019.

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} =$$

$$= C_{\omega 1} F_1 \frac{\omega}{k} P_k - C_{\omega 2} F_2 \rho \omega^2 + F_3 \frac{2}{\sigma_\omega} \frac{\rho}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (13)$$

gdzie:

F_1, F_2, F_3 – funkcje, które zawierają 6 współczynników: $C_{SEP}, C_{MIX}, C_{NW}, C_{JET}, C_{CORNER}$ i C_{CURVE} .

Wykorzystany w niniejszej pracy model GEKO jest rozszerzeniem modelu $k - \omega$, który wprowadza dodatkowe parametry pozwalające na kalibrowanie tego modelu do danego typu przepływu związanego z oddziaływaniem ścian (warstwą przyścienną) bez pogorszenia przewidywań modelu w innych przypadkach.

Współczynnik C_{SEP} to parametr optymalizujący oderwanie warstwy przyściennej w sąsiedztwie powierzchni gładkich, C_{NW} to parametr optymalizujący przepływ w nierównowagowej warstwie przyściennej, C_{MIX} i C_{JET} to parametry optymalizujące intensywność mieszania w warstwach ścinanych (warstwach mieszanych, mixing layer) i strugach swobodnych. Użyto domyślne wartości tych parametrów: $C_{SEP} = 1,75$, $C_{MIX} = 0,3$, $C_{NW} = 0,5$ oraz $C_{JET} = 0,9$, które w przybliżeniu odpowiadają modelowi $k - \omega$ SST. Wartości $C_{SEP} = 1,0$, $C_{MIX} = 0$, $C_{NW} = 1$ odpowiadają modelowi $k - \omega$.

Parametry C_{MIX} i C_{JET} są deaktywowane wewnątrz warstwy przyściennej i odgrywają rolę tylko w przepływach swobodnych (z dala od ścian).

W modelu GEKO lepkość burzliwa jest obliczana według zależności:

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\max(\omega, S/C_{Real})} \quad (14)$$

gdzie:

$C_{REAL} = 0,577$.

Przepływy burzliwe charakteryzują się występowaniem szerokiego zakresu rozmiaru wirów w domenie przestrzennej i czasowej. Największe wiry mają rozmiar porównywalny z charakterystycznym wymiarem liniowym uśrednionego przepływu. Najmniejsze wiry są odpowiedzialne za dyssypację kinetycznej energii turbulencji.

Teoretycznie jest możliwe modelowanie numeryczne całego zakresu rozmiaru wirów poprzez zastosowanie metody DNS (*Direct Numerical Simulations*)¹⁰. Jednak koszt obliczeniowy – ze względu na rozmiar siatki, jak i wielkość kroku czasowego – jest bardzo wysoki. Przykładowo dla rozwiniętego przepływu burzliwego liczba elementów może sięgać miliarda lub więcej. Dlatego też istnieje alternatywne roz-

¹⁰ K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, M. Vanella, *Fire Dynamics Simulator User's Guide*, NIST Spec. Publ. 1019 Sixth Ed. 2019, doi:10.6028.

wiązanie tego problemu. W metodzie wielkich wirów (LES) duże wiry są wyznaczone na drodze numerycznej bezpośrednio, natomiast małe wiry są modelowane¹¹.

Alternatywnym sposobem modelowania przepływu burzliwego, jednak o większym zapotrzebowaniu na moc obliczeniową niż RANS, jest użycie zmiennych „odfiltrowanych” przy pomocy funkcji filtrującej, która określa skalę najmniejszych wirów, jakie można bezpośrednio symulować, rozwiązując numerycznie „przefiltrowane” równanie Naviera-Stokesa. Jest to istotna cecha modelu LES (*Large Eddy Simulation*). Operację filtrowania można przeprowadzić w przestrzeni liczb falowych lub w przestrzeni fizycznej, kiedy to funkcja filtrująca jest związana z rozmiarem komórki obliczeniowej. Wiry, które są mniejsze od rozmiarów siatki obliczeniowej, są źródłem tzw. naprężeń podsiatkowych, które potrzebują odpowiedniego modelowania. Wymaga to zastosowania filtru $G(x, x')$, który przekształca dowolną wielkość $\varphi(x)$ charakteryzującą pole turbulencji przepływu na jej składową odfiltrowaną, która jest wyznaczana w trakcie numerycznego rozwiązywania układu równań ruchu turbulentnego. Procedura filtracji może być zapisana jako operacja splotu, która dla prostego przypadku 1D przybiera postać:

$$\bar{\varphi}(x) = \int_D \varphi(x') G(x, x') dx' \quad (15)$$

gdzie:

$$G(x, x') = \begin{cases} 1/V & \text{dla } x' \in v \\ 0 & \text{dla } x' \notin v \end{cases} \quad (16)$$

Tak więc filtrowana zmienna może być wyznaczona z następującej zależności:

$$\bar{\varphi}(x) = \frac{1}{V} \int_v \varphi(x') dx', \quad x' \in V \quad (17)$$

W większości kodów CFD w metodzie LES jako filtr stosowany jest rozmiar komórki. Stosując powyższą ideę do równań bilansu pędu, uzyskuje się postać „filtrowanych” równań Naviera-Stokesa:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (18)$$

w której pojawia się nowa wielkość:

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (19)$$

nazywana tensorem naprężeń podsiatkowych, dla której należy stworzyć odpowiedni model. Rola tego modelu (nazywanego modelem podsiatkowym) jest bardzo istotna, gdyż w prawidłowo modelowanych nieprężeniach podsiatkowych winno być zawarte ok. 20% energii turbulentnych fluktuacji. Metoda LES wykorzystuje jedną z ważnych charakterystycznych cech turbulencji. Małe skale, które wykazują

¹¹ ANSYS Inc., ANSYS Fluent, Release 2019 R3, dz. cyt.; jw.

izotropowość struktury wirów są modelowane, natomiast duże wiry o strukturze anizotropowej są obliczane numerycznie. Najważniejszą jednak zaletą metody LES jest istotna redukcja nakładów obliczeniowych w porównaniu z metodą DNS.

Wykorzystując koncepcję Boussinesqa, analogicznie jak w przypadku modelu RANS, naprężenia podsiatkowe można wyrazić przy pomocy lepkości wirowej związanej ze skalą podsiatkową:

$$\tau_{ij}^{LES} = \tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\mu_t \overline{S_{ij}} \quad (20)$$

Zgodnie z modelem Smagorynskiego-Lilly, podsiatkową lepkość burzliwą można obliczyć przy pomocy zależności:

$$\mu_t = \rho L_s^2 |\overline{S}| = \rho L_s^2 \sqrt{2 \overline{S_{ij}} \overline{S_{ij}}} \quad (21)$$

gdzie:

$$L_s = \min(\kappa d, C_s \Delta).$$

W niniejszej pracy zastosowano także model SBES (*Stress-Blended Eddy Simulation*)¹². Jest to model hybrydowy, który „przełącza” udziały modeli LES i RANS w obliczaniu naprężeń burzliwych na podstawie wartości specjalnie zdefiniowanej funkcji f_{SBES} wyznaczanej w trakcie symulacji w domenie obliczeniowej:

$$\tau_{ij}^{SBES} = f_{SBES} \cdot \tau_{ij}^{RANS} + (1 - f_{SBES}) \cdot \tau_{ij}^{LES} \quad (22)$$

gdzie:

τ_{ij}^{RANS} reprezentują udział modelu RANS,

a τ_{ij}^{LES} udział modelu LES.

Model RANS jest używany głównie w warstwie przyściennej i strefach intensywnego mieszania (wtedy $f_{SBES} = 1$), natomiast LES w pozostałym obszarze (gdzie $f_{SBES} = 0$).

2.3 Bilans składnika

W modelu procesu spalania konieczne jest uwzględnienie równania bilansu składnika j , które rozwiązuje się dla $n-1$ składników (paliwo, O_2 , CO_2 , H_2O):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_j) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_j) = -\nabla \cdot \vec{J}_j + R_j + S_j \quad (23)$$

gdzie:

R_j – jest członem źródłowym składnika j wskutek przebiegającej reakcji chemicznej w układzie (np. spalania),

¹² K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, M. Vanella, dz. cyt.

S_j – jest szybkością powstawania składnika j z fazy rozproszonej (np. pyłu węglowego lub krolek ciekłego paliwa).

W przypadku przepływu burzliwego gęstość strumienia masy składnika j w równaniu bilansu tego składnika (23) wyrażona jest jako:

$$\vec{J}_j = - \left(\rho D_{j,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla Y_j - D_{T,j} \frac{\nabla T}{T} \quad (24)$$

gdzie:

$D_{j,m}$ – jest współczynnikiem dyfuzji składnika j w mieszaninie a $D_{T,j}$ współczynnikiem termodyfuzji,

Sc_t – jest liczbą Schmidta ($Sc_t = \frac{\mu_t}{\rho D_t}$),

μ_t – jest lepkością burzliwą wyliczaną dla odpowiedniego modelu zamknięcia uśrednionych równań bilansu pędu.

W bilansie składnika R_j jest członem źródłowym związanym szybkością reakcji (produkcji lub zanikiem masy składnika j).

Najbardziej rozpowszechnioną formą opisującą kinetykę reakcji chemicznej jest zależność wykorzystująca równanie Arrhéniusa:

$$R = A \exp\left(\frac{-E_a}{R_u T}\right) T^\beta [C_f]^m [C_{ox}]^n \quad (25)$$

gdzie:

R – szybkość reakcji,

A – stała,

E_a – energia aktywacji,

C_f, C_o – stężenia paliwa i utleniacza.

Powyższy model sprawdza się w sytuacjach, kiedy szybkość reakcji jest wolna. W procesach spalania takie założenie najczęściej nie jest słuszne. Wykorzystanie tego modelu w numerycznej symulacji nastęrcza trudności z procesem zbieżności i wymaga zastosowania bardzo gęstej siatki. Ze względu na duże wartości szybkości reakcji spalania, stałe w równaniu (25) przyjmują takie wartości, że układ równań (23) i (24) staje się układem sztywnym, co nastęrcza duże problemy w uzyskaniu rozwiązania. Dlatego też istnieje konieczność zastosowania specjalnych algorytmów.

W przypadku modelowania pożarów zazwyczaj szybkość reakcji spalania paliwa jest bardzo duża i cały proces spalania jest uzależniony od szybkości mieszania paliwa (gazowego lub par paliwa ciekłego) z utleniaczem (powietrzem). Pozwala to uprościć opis matematyczny dzięki założeniu, że szybkość reakcji spalania jest nieskończenie duża i paliwo przereagowuje natychmiast po zmieszaniu z utleniaczem. Założenie takie leży u podstaw modelu zaproponowanego przez Magnussena

i Hjertagera (*Eddy-Dissipation Model*)¹³, w którym przyjęto, że szybkość reakcji jest determinowana szybkością mieszania substratów. Podobnie jak w modelu Spaldinga (Eddy Break-up) przyjęto, że szybkość reakcji jest związana ze skalą czasową mieszania przez duże wiry (k/ϵ). Jako wypadkowa szybkości reakcji dla składnika i wybierana jest mniejsza z wartości Ri obliczanych z poniższych wyrażeń:

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\epsilon}{k} \min_R \left(\frac{Y_R}{M_{w,r} v'_{R,r}} \right) \quad (26)$$

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\epsilon}{k} \frac{\sum_P Y_P}{\sum_j M_{w,j} v''_{j,r}} \quad (27)$$

gdzie:

Y_P – jest ułamkiem masowym składnika P będącego produktem reakcji spalania,

Y_R – jest ułamkiem masowym składnika R będącego substratem w reakcji spalania,

A i B – to stałe empiryczne o wartościach: $A = 4,0$, $B = 0,5$.

W przypadku modelu LES charakterystyczną szybkość mieszania burzliwego (ϵ/k) zastępuje się charakterystyczną szybkością mieszania w skali podsiatkkowej: $\sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$, gdzie $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ jest tensorem szybkości deformacji.

2.4 Bilans energii

Oprócz bilansu masy, pędu i bilansu składnika podczas modelowania pożarów należy także rozwiązywać jednocześnie równanie bilansu energii. Jego najczęściej stosowana postać wygląda następująco (28):

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot [\vec{v}(\rho E + P)] = \nabla \cdot \left[k_{\text{eff}} \nabla T - \sum_j h_j J_j + (\vec{\tau}_{\text{eff}} \cdot \vec{v}) \right] + S_h \quad (28)$$

gdzie:

k_{eff} – jest efektywnym współczynnikiem przewodzenia ciepła ($k_{\text{eff}} = k + k_t$, k_t , burzliwy współczynnik przewodzenia zdefiniowany zgodnie z modelem burzliwości),

J_j – gęstość strumienia masy składnika j .

Pierwsze trzy wyrażenia po prawej stronie równania (28) oznaczają transport energii poprzez przewodzenie, termodyfuzję i lepłą dyssypację. S_h jest członem źródłowym generowanym przez wewnętrzne źródła ciepła będące skutkiem

¹³ B.F. Magnussen, B.H. Hjertager, *On Mathematical Modeling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion*, „Symposium (International) on Combustion” 1977, 16, 1, s. 719–729. doi:10.1016/S0082-0784(77)80366-4.

np. przebiegających w układzie reakcji chemicznych. W równaniu (28) energia całkowita zdefiniowana jest w następujący sposób:

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (29)$$

Dla gazów doskonałych entalpia jest określona:

$$h = \sum_j Y_j h_j \quad (30)$$

gdzie:

Y_j – jest ułamkiem masowym składnika j oraz

$$h_j = \int_{T_{ref}}^T c_{pj} dT \quad (31)$$

W przypadku pożarów modelowanie transportu energii wymaga również uwzględnienia mechanizmu promieniowania. Wtedy, w zależności od zaimplementowanego modelu promieniowania, człon źródłowy S_h powinien również uwzględniać ten mechanizm. W przypadku modelowania pożaru do najczęściej stosowanych i zalecanych modeli promieniowania możemy zaliczyć modele P1 oraz DO (*Discrete Ordinate Model*).

W numerycznej symulacji procesu spalania mechanizm promieniowania nie może być pominięty. Obliczenia numeryczne były prowadzone z wykorzystaniem modelu Discrete Ordinates, który pozwala na uwzględnienie takich efektów, jak: absorpcja, emisja i rozproszenie promieniowania w fazie gazowej. Model ten jest opisywany poniższą zależnością:

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (\alpha + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = \alpha n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega \quad (32)$$

gdzie:

\vec{r} – wektor definiujący położenie,

\vec{s} – wektor definiujący kierunek promieniowania,

\vec{s}' – wektor definiujący kierunek rozproszonego promieniowania,

α – współczynnik absorpcji,

σ_s – współczynnik rozproszenia,

σ – stała Stefana-Boltzmana,

I – natężenie emitowanego promieniowania,

T – lokalna wartość temperatury,

Φ – funkcja fazowa,

Ω – kąt bryłowy.

Równanie (32) musi być rozwiązywane numerycznie jednocześnie z równaniem bilansu energii (28). Jest ono sprzęgnięte z tym równaniem jako człon źródłowy S_h .

2.5 Dyskretyzacja domeny obliczeniowej

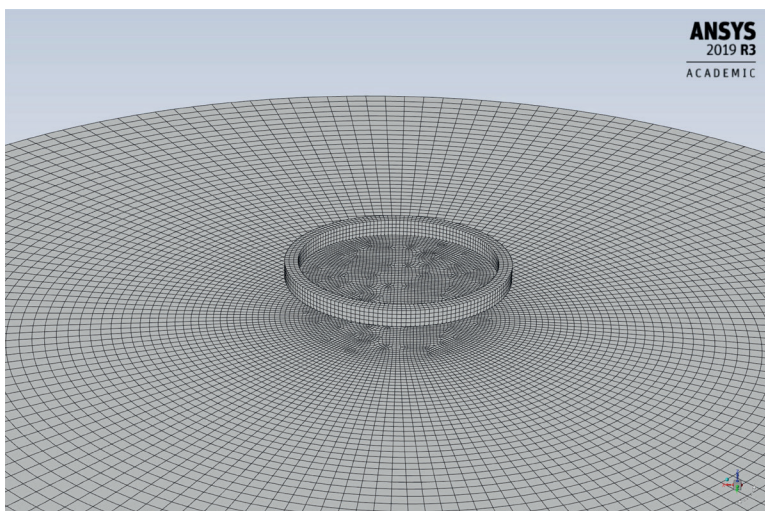
Domena obliczeniowa została zdefiniowana w geometrii trójwymiarowej (3D), w kształcie walca. Wymiary domeny obliczeniowej dla każdej z tac przedstawiono w tabeli 1. W domenie odwzorowano geometrię tacy pomiarowej, podłoża stałego oraz przestrzeni nad tacą.

Tabela 1. Wymiary domeny obliczeniowej dla tac o różnych średnicach

ROZMIAR DOMENY	TACA O ŚREDNICY 1 m	TACA O ŚREDNICY 3 m	TACA O ŚREDNICY 6 m
Wysokość	25,8 m	31,0 m	90,7 m
Średnica	20,0 m	20,0 m	60,0 m
Wysokość tacy nad ziemią	0,5 m	0,67 m	0,73 m

Źródło: opracowanie własne.

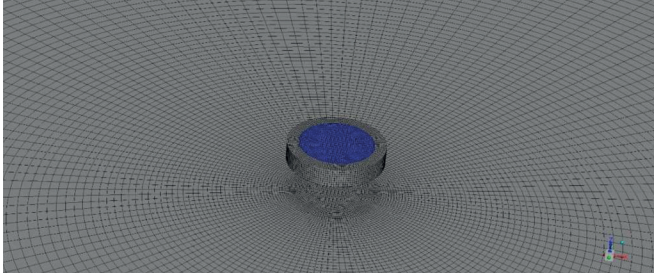
Na ryc. 1 przedstawiono wycinek siatki obliczeniowej obejmującej tacę pomiarową oraz fragment placu, na którym posadowiono tacę pomiarową o średnicy 3 m.



Ryc. 1. Powiększony widok siatki w okolicach tacy pomiarowej o średnicy 3 m

Źródło: opracowanie własne.

W obliczeniach przyjęto, że wewnątrz tacy jest wypełnione paliwem i powierzchnia cieczy znajduje się na wysokości krawędzi tej konstrukcji. Siatkę obliczeniową dla tacy o średnicy 1 m z zaznaczoną kolorem niebieskim powierzchnią paliwa przedstawiono na ryc. 2. Na powierzchni paliwa założono warunek brzegowy typu *Inlet* uwzględniający gęstość strumienia masy odparowującego paliwa. Przyjęte do obliczeń wartości tego strumienia podano w tabeli 2.



Ryc. 2. Widok fragmentu siatki obliczeniowej w okolicach tacy o średnicy 1 m z uwidocznioną powierzchnią paliwa

Źródło: opracowanie własne.

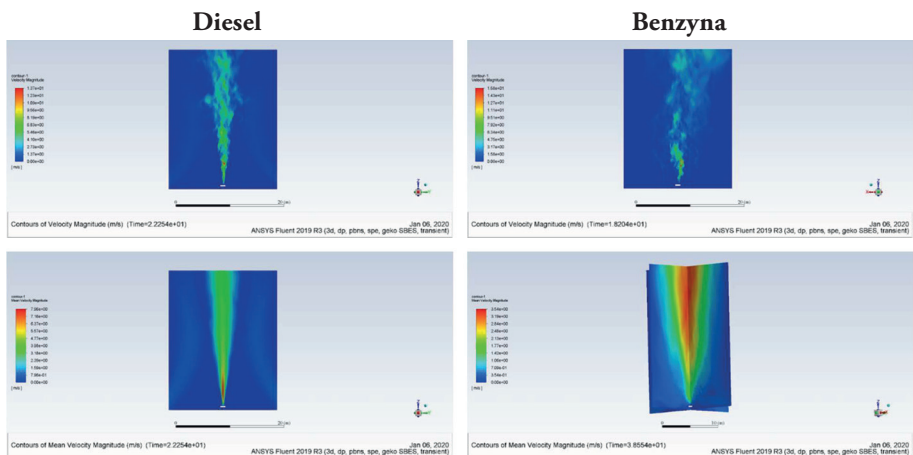
Na bokach i górnej powierzchni domeny obliczeniowej przyjęto warunek typu *Pressure outlet*, natomiast na powierzchni gruntu oraz na ścianach tacy zastosowano warunek typu *Wall*.

Obliczenia prowadzono traktując proces jako nieustalony, stosując stałą długość kroku całkowania. Po inicjalizacji obliczeń i osiągnięciu warunków pseudoustalonych rozpoczęto uśrednianie w czasie pól temperatury i prędkości.

3. Wyniki i dyskusja

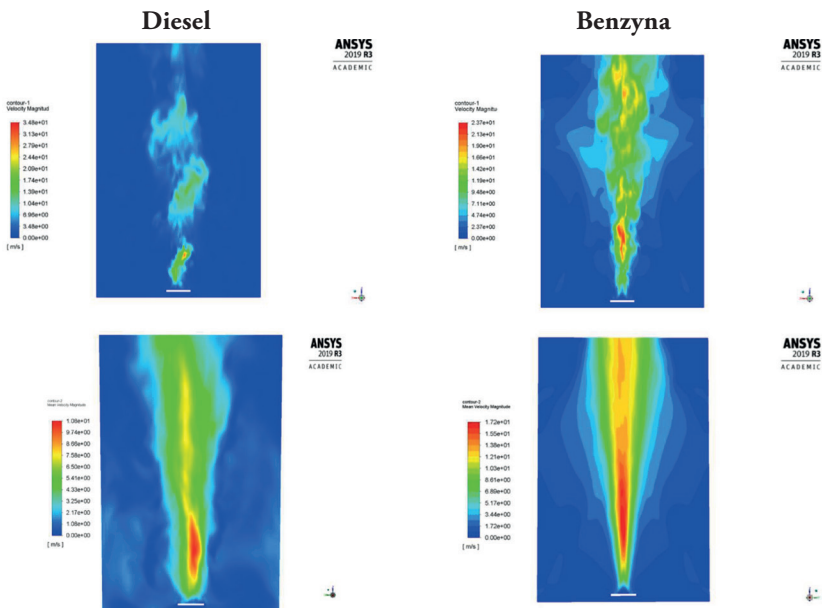
3.1 Pola prędkości

Na ryc. 3–5 przedstawiono chwilowe oraz uśrednione pola prędkości obliczone dla każdej z tac podczas symulacji pożaru powierzchniowego benzyny i oleju napędowego.



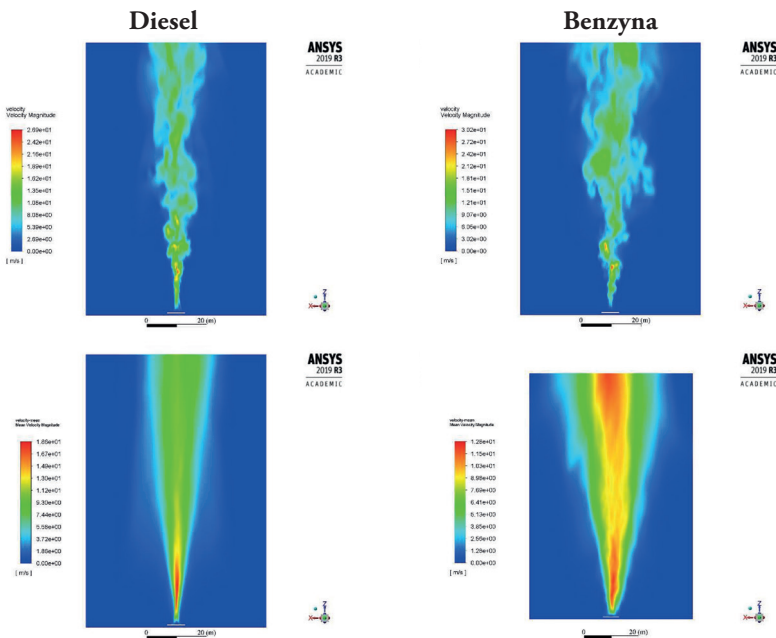
Ryc. 3. Chwilowe (górną) i uśrednione (dół) pola prędkości w pożarach powierzchniowych diesla i benzyny na tacy pomiarowej o średnicy $d = 1$ m

Źródło: opracowanie własne.



Ryc. 4. Chwilowe (górną) i uśrednione (dolną) pola prędkości w pożarach powierzchniowych diesla i benzyny na tacy pomiarowej o średnicy $d = 3\text{ m}$

Źródło: opracowanie własne.

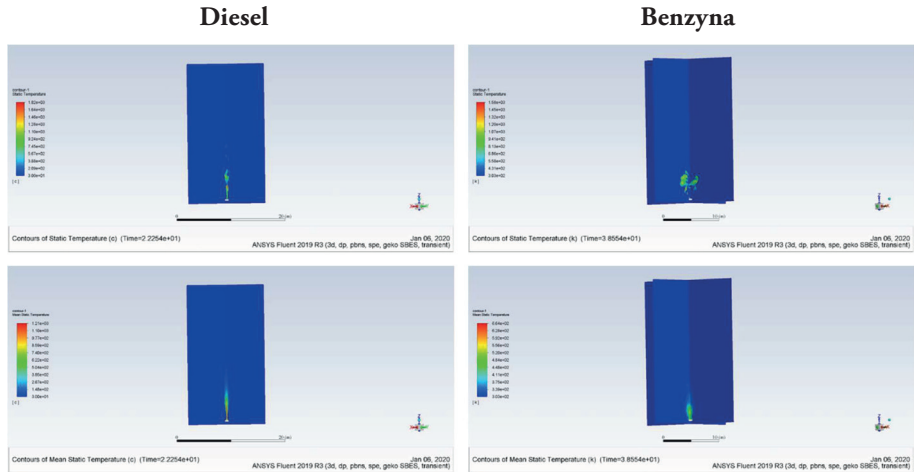


Ryc. 5. Chwilowe (górną) i uśrednione (dolną) pola prędkości w pożarach powierzchniowych diesla i benzyny na tacy pomiarowej o średnicy $d = 6\text{ m}$

Źródło: opracowanie własne.

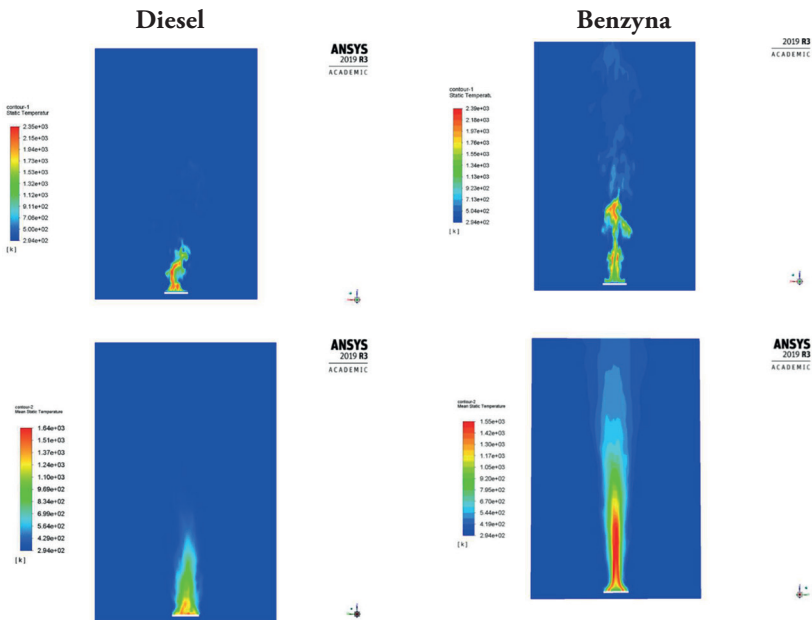
3.2 Pola temperatur

Na ryc. 6–8 przedstawiono chwilowe oraz uśrednione pola temperatury obliczone dla każdej z tac podczas symulacji pożaru powierzchniowego benzyny i oleju napędowego.



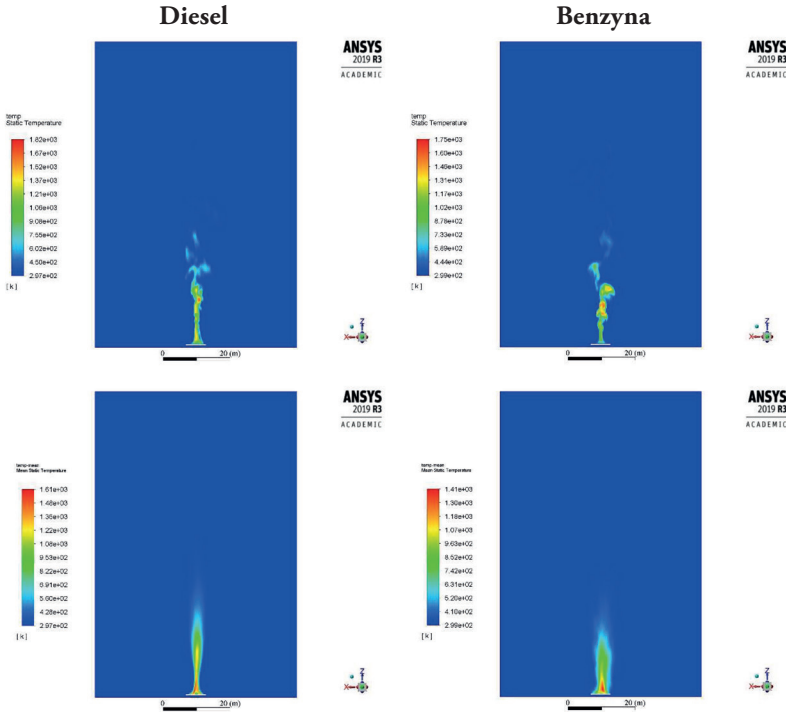
Ryc. 6. Chwilowe (góra) i uśrednione (dół) pola temperatur w pożarach powierzchniowych diesla i benzyna na tacy pomiarowej o średnicy $d = 1$ m

Źródło: opracowanie własne.



Ryc. 7. Chwilowe (góra) i uśrednione (dół) pola temperatur w pożarach powierzchniowych diesla i benzyna na tacy pomiarowej o średnicy $d = 3$ m

Źródło: opracowanie własne.



Ryc. 8. Chwilowe (górną) i uśrednione (dół) pola temperatur w pożarach powierzchniowych diesla i benzyna na tacy pomiarowej o średnicy $d = 6$ m

Źródło: opracowanie własne.

3.3 Osiove profile temperatur

Na ryc. 9 i 10 przedstawiono osiowe profile temperatur obliczone dla pożarów powierzchniowych diesla i benzyna na tacach pomiarowych o średnicach 1 m, 3 m i 6 m. Na wykresach porównano ze sobą wyniki symulacji CFD oraz obliczeń uzyskanych przy pomocy równania (33)¹⁴:

$$\Delta T_0 = 9,1 \left(\frac{T_\infty}{g c_p^2 \rho_\infty^2} \right)^{1/3} \dot{Q}_c^{2/3} (z - z_0)^{-5/3} \quad (33)$$

gdzie:

T_∞ – temperatura otoczenia [K],

g – wartość przyspieszenia ziemskiego [m/s^2],

c_p – ciepło właściwe powietrza przy stałym ciśnieniu [kJ/kg K],

¹⁴ G. Heskestad, *Fire Plumes, Flame Height, and Air Entrainment*, w: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, M.J. Hurley, D. Gottuk, J.R. Hall, K. Harada, E. Kuligowski, M. Puchovsky, J. Torero, J.M. Watts, C. Wieczorek (red.), Springer New York, New York 2016, s. 53. doi:10.1007/978-1-4939-2565-0.

ρ_{∞} – gęstość powietrza w temperaturze otoczenia [kg/m^3]
 (w obliczeniach przyjęto $T_{\infty} = 293$ [K], $g = 9,81$ [m/s^2], $c_p = 1,00$ [kJ/kgK],
 $\rho_{\infty} = 1,2$ [kg/m^3]),
 \dot{Q}_c – konwekcyjny strumień ciepła [kW] (w obliczeniach przyjęto stosunek
 $\dot{Q}_c/\dot{Q} = 0,7^{15}$),
 z – wysokość nad powierzchnią paliwa [m],
 z_0 – wysokość pozornego źródła masy [m].

Wysokość pozornego źródła masy, z_0 , obliczano z równania (34)¹⁶:

$$\frac{z_0}{D} = -1,02 + 0,083 \frac{\dot{Q}^{2/5}}{D} \quad (34)$$

gdzie:

D – średnica tacy pomiarowej [m],
 \dot{Q} – całkowity strumień ciepła [kW].

Całkowity strumień ciepła, \dot{Q} , obliczano z równania (35)¹⁷:

$$\dot{Q} = m'' \Delta H_c A \quad (35)$$

gdzie:

m'' – gęstość strumienia masy odparowanego paliwa [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$],
 ΔH_c – ciepło spalania paliwa [kJ/kg],
 $A = \frac{\pi D^2}{4}$ – powierzchnia tacy [m^2].

Gęstość strumienia masy odparowanego paliwa, m'' , obliczono z równania (36). Dane do obliczeń pochodziły z badań doświadczalnych przeprowadzonych przez CNBOP-PIB¹⁸:

$$m'' = \frac{V\rho}{At} \quad (36)$$

gdzie:

V – objętość paliwa [m^3],
 ρ – gęstość paliwa [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$],
 A – powierzchnia tacy [m^2],
 t – czas spalania [s].

W tabeli 2 przedstawiono wyniki obliczeń gęstości strumienia masy odparowanego paliwa, całkowitego strumienia ciepła oraz wysokość pozornego źródła masy dla pożarów powierzchniowych diesla i benzyny na tacach pomiarowych o średnicach 1 m, 3 m i 6 m.

¹⁵ jw.

¹⁶ jw.

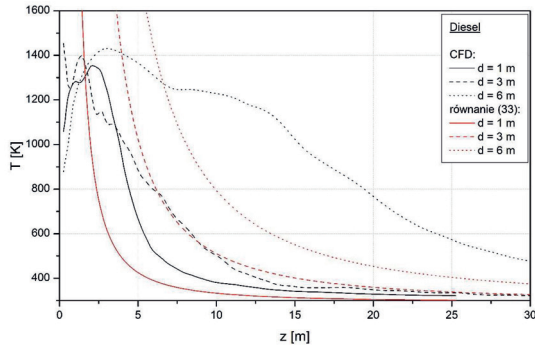
¹⁷ jw.

¹⁸ Rozdział 2 pt. „Badania pożarów powierzchniowych i strumieniowych w dużej skali” niniejszej monografii.

Tabela 2. Obliczone wartości gęstości strumienia masy odparowanego paliwa, całkowitego strumienia ciepła oraz wysokość pozornego źródła masy dla pożarów powierzchniowych diesla i benzyny na tacach pomiarowych o średnicach 1 m, 3 m i 6 m

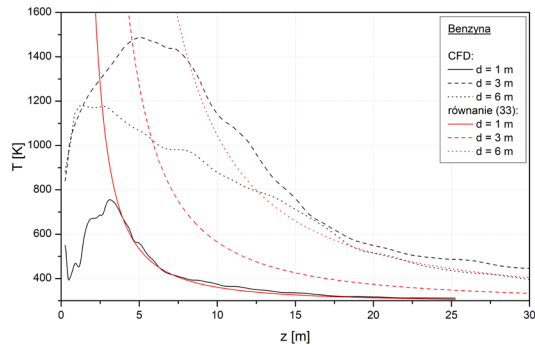
ZMIENNA	ŚREDNICA TACY d = 1 m		ŚREDNICA TACY d = 3 m		ŚREDNICA TACY d = 6 m	
	Diesel	Benzyna	Diesel	Benzyna	Diesel	Benzyna
m'' [kg/m ² s] (r-nie 36)	0,025	0,05	0,034	0,044	0,034	0,05
\dot{Q} [kW] (r-nie 35)	872	1716	10671	13591	42683	61779
z_0 [m] (r-nie 34)	0,225	0,613	0,331	0,676	-0,216	0,726

Źródło: opracowanie własne.



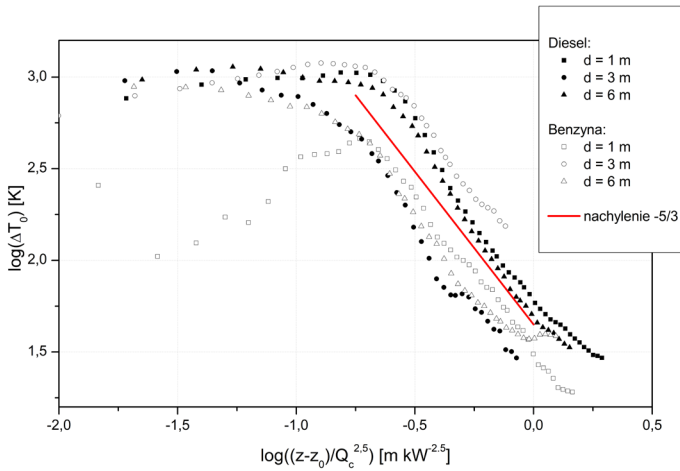
Ryc. 9. Osieowe profile temperatur dla pożarów powierzchniowych diesla na tacach pomiarowych o średnicach $d = 1$ m, 3 m i 6 m – porównanie wyników otrzymanych z symulacji CFD oraz obliczonych z równania (33)

Źródło: opracowanie własne.



Ryc. 10. Osieowe profile temperatur dla pożarów powierzchniowych benzyny na tacach pomiarowych o średnicach $d = 1$ m, 3 m i 6 m – porównanie wyników otrzymanych z symulacji CFD oraz obliczonych z równania (33)

Źródło: opracowanie własne.



Ryc. 11. Linearyzacja osiowych profili temperatur zgodnie z równaniem (33)

Źródło: opracowanie własne.

Porównanie wyników przedstawionych na ryc. 9 i 10 pokazuje odmienny charakter zmian osiowych profili temperatur w funkcji wysokości dla symulacji CFD i obliczeń wykonanych przy pomocy równania (33). Symulacje CFD przewidują najpierw wzrost temperatury, a następnie jej spadek. Z kolei temperatury obliczone przy pomocy równania (33) przedstawiają monotoniczny spadek temperatury wraz ze wzrostem wysokości. Jednak porównanie wyników symulacji CFD uzyskanych w tej pracy oraz wyników pomiarów przedstawionych w pracy A. Attar i in.¹⁹ dla pożarów powierzchniowych benzyny, nafty i nadtlenu pokazuje profil temperatury w funkcji wysokości z charakterystycznym maksimum. Podobne wyniki otrzymali również C.H. Lin i in.²⁰ Na tej podstawie można stwierdzić, że osiowe profile temperatur otrzymane w wyniku obliczeń CFD w tej pracy są zgodne jakościowo z wynikami badań innych autorów. Należy jednak podkreślić, iż równanie (33) ma z założenia zastosowanie tylko dla wysokości większych niż wysokość płomienia²¹. Dla tego zakresu spadek temperatury w funkcji odległości od źródła pożaru ma charakter monotoniczny, co znalazło także odzwierciedlenie w wynikach obliczeń CFD.

Porównanie odpowiednich odcinków krzywych w zakresie monotonicznego spadku temperatury w funkcji wysokości pokazuje, że najlepszą zgodność wyników obliczeń CFD z równaniem (33) otrzymano dla tac o średnicach 1 m i 3 m w przypadku diesla oraz dla tac o średnicach 1 m i 6 m w przypadku benzyny. Dla pozostałych przypadków różnice pomiędzy obliczonymi temperaturami i przewidywaniami równania (33) są większe.

¹⁹ A.A. Attar, M. Pourmahdian, B. Anvaripour, dz. cyt.

²⁰ C.H. Lin, Y.M. Ferng, W.S. Hsu, B.S. Pei, *Investigations on the Characteristics of Radiative Heat Transfer in Liquid Pool Fires*, „Fire Technology” 2010, 46, s. 321–345. doi:10.1007/s10694-008-0071-7.

²¹ G. Heskestad, dz. cyt.

Na ryc. 11 przedstawiono linearyzację osiowych profili temperatur otrzymanych z symulacji CFD na podstawie równania (33). Można zauważyć, iż profile temperatury poza strefą płomienia układają się na tym wykresie wzdłuż linii prostej o nachyleniu $(-5/3)$, co jest zgodne z równaniem (33).

3.4 Wysokości płomienia

Na ryc. 12 i 13 przedstawiono wysokości płomienia obliczone dla pożarów powierzchniowych diesla i benzyny na tacach pomiarowych o średnicach 1 m, 3 m i 6 m. Na wykresach porównano ze sobą wyniki symulacji CFD oraz obliczeń uzyskanych z korelacji Heskestada i Thomasa²².

W metodzie zaproponowanej przez Heskestada wysokość płomienia jest obliczana zgodnie z równaniem (37):

$$H_f = 0,235\dot{Q}^{2/5} - 1,02D \quad (37)$$

gdzie:

H_f – wysokość płomienia [m],

\dot{Q} – całkowity strumień ciepła w pożarze powierzchniowym [kW],

D – średnica tacy pomiarowej [m].

W metodzie zaproponowanej przez Thomasa wysokość płomienia jest obliczana zgodnie z równaniem (38):

$$H_f = 42D(m''/\rho_a\sqrt{gD})^{0,61} \quad (38)$$

gdzie:

H_f – wysokość płomienia [m],

m'' – gęstość strumienia masy odparowanego paliwa [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$],

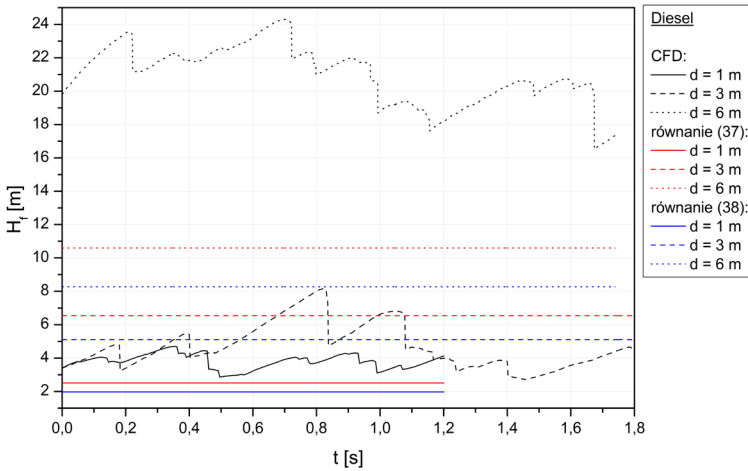
ρ_a – gęstość powietrza w temperaturze otoczenia [kg/m^3],

D – średnica tacy pomiarowej [m], g to przyspieszenie ziemskie [m/s^2].

W obliczeniach CFD wysokość płomienia dla diesla i benzyny wyznaczano w oparciu o kryterium 99% przereagowania paliw²³. Zgodnie z przyjętym kryterium wysokość płomienia była obliczana jako maksymalna wysokość izopowierzchni dla stałej wartości ułamka masowego paliwa równej 0,01.

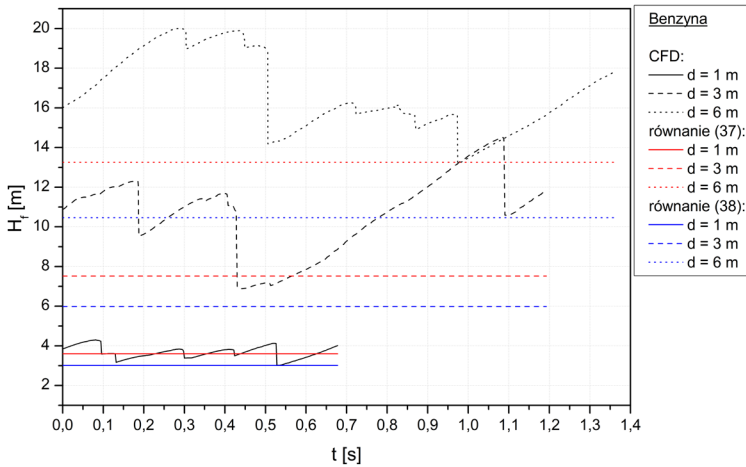
²² jw.

²³ K. McGrattan, R. McDermott, J. Floyd, S. Hostikka, G. Forney, H. Baum, *Computational Fluid Dynamics Modelling of Fire*, „International Journal of Computational Fluid Dynamics” 2012, 26, s. 349–361. doi:10.1080/10618562.2012.659663; T.G. Ma, J.G. Quintiere, *Numerical Simulation of Axi-Symmetric Fire Plumes: Accuracy and Limitations*, „Fire Safety Journal” 2003, 38, s. 467–492. doi:10.1016/S0379-7112(02)00082-6.



Ryc. 12. Wysokość płomienia w pożarze powierzchniowym diesla na tacach pomiarowych o średnicach $d = 1\text{ m}$, 3 m i 6 m – porównanie wyników obliczeń CFD oraz otrzymanych z korelacji Heskestada i Thomasa

Źródło: opracowanie własne.



Ryc. 13. Wysokość płomienia w pożarze powierzchniowym benzyny na tacach pomiarowych o średnicach $d = 1\text{ m}$, 3 m i 6 m – porównanie wyników obliczeń CFD oraz otrzymanych z korelacji Heskestada i Thomasa

Źródło: opracowanie własne.

4. Podsumowanie i wnioski

Praca ma bezpośredni związek z projektem, w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych na rzecz obronności oraz bezpieczeństwa państwa, finansowanym przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju i realizowanym w ramach powołanego konsorcjum. W pracy przedstawiono metodykę obliczeń CFD (ANSYS Fluent) w odniesieniu do pożarów powierzchniowych benzyny i diesla na tacach pomiarowych w stosunkowo dużej skali, o średnicach 1 m, 3 m i 6 m. Opracowany model CFD obejmuje model matematyczny (bilanse: masy, pędu, składnika, energii) oraz dyskretyzację domeny obliczeniowej. Wyniki symulacji numerycznych przedstawiono w postaci map z rozkładami prędkości i temperatur oraz profili temperatur i wysokości płomienia. Testowanie modelu CFD przeprowadzono na podstawie porównania z wynikami obliczeń opartych na równaniach (33) i (37–38). W zakresie stosowalności równania (33), tzn. dla wysokości większych niż wysokość płomienia, stwierdzono zgodność wyników obliczeń CFD z wynikami obliczeń za pomocą równania (33). Porównanie wyników wysokości płomienia obliczonych na podstawie CFD i równań (37–38) pokazało lepszą zgodność wyników dla tac pomiarowych o średnicach 1 m i 3 m oraz gorszą dla tacy o średnicy 6 m (szczególnie w odniesieniu do diesla). Możliwym powodem tych różnic jest stosunkowo mała gęstość siatki obliczeniowej. Otrzymane wyniki wskazują na konieczność dalszej walidacji i ewentualnej weryfikacji modelu CFD w oparciu o wyniki badań doświadczalnych, które są przeprowadzane w ramach realizowanego projektu.

Literatura

- ANSYS Inc., ANSYS Fluent, Release 2019 R3, Help System, Canonsburg, PA 15317, 2019.
- Attar A.A., Pourmahdian M., Anvaripour B., *Experimental Study and CFD Simulation of Pool Fires*, „International Journal of Computer Applications” 2013, 70.
- Cajot L.G., Haller M., Pierre M., Seminarium – *Projektowanie konstrukcji stalowych zespolonych z uwzględnieniem warunków pożarowych*, DIFISEK, Poznań 2008.
- Final Report CEC Agreement 7210 / SA210, *Development of Design Rules for Steel Structures Subjected to Natural Fires in Large Compartments*, 1997.
- Guzewski P., Wróblewski D., Małozieć D., *Czerwona Księga Pożarów*, CNBOP-PIB, Józefów 2014.
- Hasemi Y., Yokobayashi S., Wakamatsu T., Ptchelintsev A., *Fire Safety of Building Components Exposed to a Localized Fire*, Proc. First Int. ASIAFLAM Conf., 1995.
- Heskestad G., *Fire Plumes, Flame Height, and Air Entrainment*, w: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, M.J. Hurley, D. Gottuk, J.R. Hall, K. Harada, E. Kuligowski, M. Puchovsky, J. Torero, J.M. Watts, C. Wieczorek (red.), Springer New York 2016.

- Johansson N., Svensson S., van Hees P., *An Evaluation of Two Methods to Predict Temperatures in Multi-Room Compartment Fires*, „Fire Safety Journal” 2015, 77.
- Lin C.H., Ferng Y.M., Hsu W.S., Pei B.S., *Investigations on the Characteristics of Radiative Heat Transfer in Liquid Pool Fires*, „Fire Technology” 2010, 46.
- McGrattan K., McDermott R., Floyd J., Hostikka S., Forney G., Baum H., *Computational Fluid Dynamics Modelling of Fire*, „International Journal of Computational Fluid Dynamics” 2012, 26.
- Ma T.G., Quintiere J.G., *Numerical Simulation of Axi-Symmetric Fire Plumes: Accuracy and Limitations*, „Fire Safety Journal” 2003, 38.
- Magnussen B.F., Hjertager B.H., *On Mathematical Modeling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion*, „Symposium (International) on Combustion” 1977, 16, 1.
- McGrattan K., Hostikka S., McDermott R., Floyd J., Vanella M., *Fire Dynamics Simulator User’s Guide*, NIST Spec. Publ. 1019 Sixth Ed. 2019.
- Rengel B., Mata C., Pastor E., Casal J., Planas E., *A Priori Validation of CFD Modelling of Hydrocarbon Pool Fires*, „Journal of Loss Prevention in the Process Industries” 2018, 56.
- Schälike S., Wehrstedt K.D., Gawłowski M., Schönbacher A., *Validation of Sub-models for CFD Simulation of N-Hexane Pool Flames Including Interferometry*, „Chemie-Ingenieur-Technik” 2012, 84, 4.
- Snegirev A., Markus E., Kuznetsov E., Harris J., Wu T., *On Soot and Radiation Modeling in Buoyant Turbulent Diffusion Flames*, „Heat Mass Transfer” 2018, 54.
- Tibbats J., McCormick S., Karanjkar A., *Fire Modelling Using CFD: Smoke Management and the Improved Prediction of Visibility*, Materiały Firmy ANSYS Inc. (n.d.).

ROZDZIAŁ IV.

**WYKORZYSTANIE
OBLICZENIOWEJ MECHANIKI PŁYNÓW
DO MODELOWANIA
MATEMATYCZNEGO
POŻARÓW STRUMIENIOWYCH
NA POTRZEBY PROJEKTU EVARIS**

Michał Lewak, Eugeniusz Molga

*Politechnika Warszawska
Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej*

1. Wprowadzenie

Podstawowym zadaniem projektu EVARIS było wyposażenie Straży Pożarnej w narzędzie programistyczne pozwalające na symulacje zjawisk niepożądanych, takich jak: dyspersja zanieczyszczeń, wybuch, deflagracja, detonacja oraz pożar. Przy pomocy tworzonoego programu użytkownicy będą mogli określić strefy bezpieczeństwa przy kreowaniu scenariuszy awaryjnych dla danego zjawiska niepożądanego. Dzięki projektowi EVARIS, Państwowa Straż Pożarna wzbogaci się o bardzo przydatne narzędzie analityczne. Jednakże, wykonanie uniwersalnego programu wiąże się z przyjęciem pewnych założeń projektowych. Jednym z podstawowych założeń do programu było to, że musi pozwalać na symulacje zjawisk w takim stopniu, aby wyniki były generowane w rozsądnym czasie. Ponadto program nie powinien mieć zbyt dużych wymagań dotyczących sprzętu komputerowego, na którym będzie uruchamiany. Z uwagi, że program w głównej mierze bazuje na analitycznych modelach matematycznych musiał być poddany walidacji doświadczalnej. Walidacja ta odbyła się na dwóch poziomach. Na pierwszym poziomie walidacji poddano bardziej zaawansowane modele matematyczne bazujące na obliczeniach numerycznych. Na drugim poziomie, wykorzystując obliczenia numeryczne, sprawdzono zakres stosowalności modeli matematycznych zawartych w budowanym narzędziu programistycznym. Głównym zadaniem grupy badawczej z Politechniki Warszawskiej była symulacja numeryczna zjawisk nagłego uwolnienia substancji niebezpiecznej przy pomocy obliczeniowej mechaniki płynów Computational Fluid Dynamics (CFD). Jednym z symulowanych zjawisk niepożądanych było wystąpienie pożaru strumieniowego.

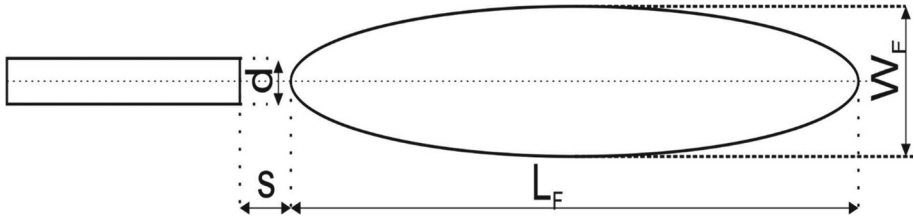
W tym rozdziale przedstawione zostaną główne założenia pozwalające na symulacje pożarów strumieniowych przy pomocy obliczeniowej mechaniki płynów. Gazem wykorzystywanym do badań doświadczalnych był propan CZDA, wobec czego dla tego gazu wykonano symulacje CFD. W pracy przedstawione zostaną cztery etapy, jakie należy wykonać, aby poprawnie przeprowadzić analizę wyników nagłego uwolnienia substancji niebezpiecznej. W pierwszej kolejności przeprowadzona zostanie krótka analiza literaturowa dotycząca modelowania matematycznego pożarów strumieniowych. Następnie wykonana zostanie geometria symulowanego obszaru, na który nałożona zostanie siatka numeryczna. W dalszej części pracy pokazane zostanie podejście pozwalające: przygotować siatkę numeryczną,

wykonać na siatce numerycznej obliczenia oraz dokonać analizy otrzymanych wyników. Autorzy tej pracy do obliczeń numerycznych wybrali pakiet firmy ANSYS, który umożliwia pełną analizę wyników symulacji numerycznych. Wybór oprogramowania firmy ANSYS podyktowany był wynikami przeprowadzonej analizy SWOT, która nie jest przedmiotem tej pracy. Wybrany pakiet do symulacji CFD jest w czołówce najlepszych programów umożliwiających symulacje numeryczne przy pomocy obliczeniowej mechaniki płynów. Szczególną jego zaletą jest możliwość podłączania do obliczeń numerycznych funkcji definiowanych przez użytkownika. Dzięki temu wyniki symulacji numerycznych lepiej odwzorowują przebieg rzeczywistego procesu.

2. Pożar strumieniowy

Jednym z rozpatrywanych scenariuszy awaryjnych jest miejscowe uszkodzenie zbiornika lub rurociągu, w którym przechowywany jest gaz palny. W wyniku takiego uszkodzenia powstaje otwór, przez który gaz wydostaje się ze zbiornika i ulega zapłonowi. Prowadzi to do powstania pożaru strumieniowego, który cechuje spalanie gazu bez wstępnego wymieszania paliwa z powietrzem. Tego typu pożary są bardzo niebezpieczne, ponieważ długość oraz szerokość płomienia zależą od wielu parametrów procesowych i meteorologicznych, takich jak ciśnienie, pod jakim znajduje się gaz w zbiorniku, od jego temperatury, od wielkości otworu, przez który uwalnia się gaz. To wszystko wpływa na prędkość gazu na wylocie ze zbiornika, a zatem na długość płomienia oraz jego szerokość. Ponadto główny kierunek płomienia zależy od kierunku i prędkości wiatru, który dodatkowo może powodować wzrost szybkości reakcji spalania. Dość niebezpiecznym zjawiskiem jest przejście pożaru strumieniowego w deflagrację lub spalanie detonacyjne. W związku z tym badania numeryczne dotyczące pożarów strumieniowych pozwalają na określenie stref bezpieczeństwa oraz na tworzenie procedur ochronnych wykorzystywanych podczas pożaru.

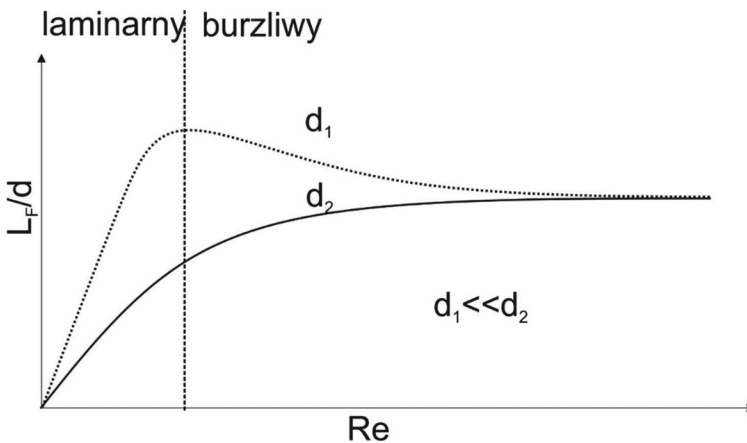
W literaturze związanej z modelowaniem matematycznym pożarów strumieniowych bardzo często stosuje się uproszczenia, które pozwalają opisać pożar strumieniowy, podobnie jak to się czyni podczas modelowania matematycznego reakcji spalania w palnikach gazowych. W tego typu urządzeniach płomień ma kształt elipsoidy obrotowej. Płomień jest symetryczny względem osi dyszy wylotowej gazu. Kształt płomienia określają trzy parametry (patrz ryc. 1).



Ryc. 1. Parametry procesowe określające główne wymiary płomienia

Źródło: opracowanie własne.

Pierwszy parametr wyznacza długość płomienia L_F [m], drugi parametr określa szerokość płomienia W_F [m], trzeci parametr s [m] opisuje odległość od dyszy do miejsca, w którym zaczyna się reakcja spalania, a więc strefę mieszania paliwa z powietrzem. W części prac stosuje się inne określenie szerokości płomienia, zamiast parametru W_F określa się wysokość płomienia liczoną od osi dyszy do końca obszaru zajętego przez płomień. Charakter spalania ustala się w zależności od liczby Reynoldsa wyznaczonej dla warunków procesowych gazu opuszczającego dyszę¹. W przypadku małych prędkości gazu mamy do czynienia ze spalaniem laminarnym, w którym długość płomienia gazu L_F w przybliżeniu rośnie liniowo z prędkością gazu. Na ryc. 2 przedstawiono wpływ liczby Reynoldsa na bezwymiarową długość płomienia L_F/d . Liczba Reynoldsa obliczana jest dla parametrów fizykochemicznych oraz procesowych gazu na wylocie z dyszy, którą gaz podawany jest do obszaru.



Ryc. 2. Wpływ liczby Reynoldsa na bezwymiarową długość płomienia

Źródło: opracowanie własne.

¹ V. Molkov, J.-B. Saffers, *Hydrogen Jet Flames*, „International Journal of Hydrogen Energy” 2013, 38(19), s. 8141–8158.

W obszarze laminarnego wypływu gazu z dyszy spalanie jest powolne z tendencją do tworzenia się sadzy, która nadaje płomieniowi żółto-czerwony kolor. W tym obszarze płomień nie odrywa się od dyszy, a zatem parametr wynosi $s = 0$. Jest to stabilny proces spalania gazu. Dla większych prędkości gazu na wylocie, tj. przy liczbie $Re = 2000^2$, przepływ przechodzi w spalanie burzliwe, które charakteryzuje się dużą szybkością reakcji utleniania gazu. Im większa liczba Reynoldsa, tym intensywniejsze spalanie gazu. W obszarze przejściowym, po osiągnięciu maksimum, dalszy wzrost szybkości gazu na wylocie z dyszy powoduje lekki spadek bezwymiarowej długości płomienia L_F/d w porównaniu ze spalaniem laminarnym (patrz ryc. 2). Dzieje się tak, ponieważ rośnie szybkość reakcji spalania, a zatem gaz od wylotu z dyszy przed całkowitym utlenieniem pokona mniejszą odległość. Spadek bezwymiarowej długości płomienia w obszarze przejściowym może być tym większy, im mniejsza jest średnica dyszy³. Oznacza to, że dla dysz o małych średnicach bezwymiarowa długość płomienia L_F/d może mieć znacznie większe wartości niż dla dysz o dużych średnicach. Nie wynika z tego wcale, że długość płomienia podczas pożarów strumieniowych dla dysz o dużych średnicach jest mniejsza niż dla dysz o mniejszych d , jest wręcz odwrotnie. W pracy Molkov i Saffers⁴ dotyczącej spalania wodoru, autorzy podają, że dla średnicy dyszy równej 1,75 mm maksymalna wartość bezwymiarowej długości płomienia wynosi około $L_F/d = 280$. Podczas gdy dla średnicy dyszy równej $d = 51,7$ mm ten sam parametr wynosi około $L_F/d = 37$. Z tych danych jasno wynika, że dysza o większej średnicy wytwarza dłuższy maksymalny płomień. Przy czym, dla większej średnicy brak jest maksimum na wykresie $L_F/d = f(Re)$. Wzrost liczby Reynoldsa powyżej pewnej granicznej wartości przestaje mieć wpływ na długość płomienia.

Z punktu widzenia projektu EVARIS interesujące są dwa zakresy, w jakich przebiega pożar strumieniowy. Rozpatrzmy proces spalania gazu, który opuszcza dyszę o średnicy d z prędkością u_{fuel} . W pierwszym zakresie (małe liczby Reynoldsa) siły ciężkości mają większy wpływ na bilans pędu a tym samym na mieszanie paliwa z powietrzem. Przebieg procesu spalania w tym obszarze zależy od sił ciężkości, dlatego kształt i długość płomienia ulegają zmianie, przy czym wzrost długości płomienia jest niemalże liniową funkcją liczby Reynoldsa⁵. W tym zakresie spalanie jest na tyle stabilne, że nie powoduje przejścia pożaru w deflagrację. W drugim zakresie charakter przepływu gazu opuszczającego dyszę zaczyna się zmieniać. Wiadać to szczególnie na krzywej $L_F/d = f(Re)$, która zmienia swój kształt. W tym momencie pojawia się oderwanie płomienia od dyszy, spadek parametru L_F/d , a zatem siły bezwładności zaczynają odgrywać większą rolę w procesie spalania.

² jw.

³ V.K. Baev, P.P. Kuznetsov i in., *Length of Diffusion Flames*, „Combustion, Explosion, and Shock Waves” 1974, 10(4), s. 420–426.

⁴ V. Molkov, J.-B. Saffers, dz. cyt.

⁵ G. Shevyakov, V. Komov, *Effect of Noncombustible Admixtures on Length of an Axisymmetric On-Port Turbulent Diffusion Flame*, „Combustion, Explosion, and Shock Waves” 1977, 13, s. 563–566; V. Molkov, J.-B. Saffers, dz. cyt.

Inaczej, na krótszym odcinku dochodzi do spalania całej ilości paliwa. Dalsze zwiększanie prędkości gazu na wylocie powoduje ustalenie się parametru L_F/d , ponieważ siły ciężkości w procesie spalania przestają mieć jakiegokolwiek znaczenie. Natomiast zwiększenie burzliwości nie prowadzi do zwiększenia szybkości reakcji spalania. Z punktu widzenia projektu ten typ spalania jest szczególnie niebezpieczny, ponieważ może prowadzić do przejścia pożaru w deflagrację, a przy sprzyjających warunkach do detonacji.

Poniżej przedstawiono korelacje literaturowe pozwalające określić zależności parametru L_F/d od wielkości opisujących proces. Shevyakov i Komov⁶ podali korelację wyznaczoną doświadczalnie w procesie spalania metanu do obliczenia bezwymiarowej długości płomienia w oparciu o liczbę Froude'a [patrz równanie (1)]:

$$Fr = \frac{u_{fuel}^2}{g \cdot d} \quad (1)$$

Dla liczb Froude'a $Fr \leq 10^5$ równanie wyrażone jest zależnością (2):

$$\frac{L_F}{d} = 14 \cdot Fr^{0,2} \quad (2)$$

Dla liczb Froude'a $2 \cdot 10^6 > Fr > 10^5$ [patrz równanie (3)]:

$$\frac{L_F}{d} = 24 \cdot Fr^{1/7} \quad (3)$$

Dla liczb Froude'a $Fr \geq 2 \cdot 10^6$ stosunek L_F/d wyrażony jest zależnością (4):

$$\frac{L_F}{d} = 220 \quad (4)$$

Molkov i Saffers⁷ dla danych podanych w pracy Shevyakov i Komov⁸ proponują zależności opisane równaniami (5–7).

Dla liczb Froude'a $Fr \leq 10^5$:

$$\frac{L_F}{d} = 15,8 \cdot Fr^{1/5} \quad (5)$$

Dla liczb Froude'a $2 \cdot 10^6 > Fr > 10^5$:

$$\frac{L_F}{d} = 37,5 \cdot Fr^{1/8} \quad (6)$$

⁶ G. Shevyakov, V. Komov, dz. cyt.

⁷ V. Molkov, J.-B. Saffers, dz. cyt.

⁸ G. Shevyakov, V. Komov, dz. cyt.

Dla liczb Froude'a $Fr \geq 2 \cdot 10^6$:

$$\frac{L_F}{d} = 230 \quad (7)$$

V.K. Baev i in.⁹ proponują zakres laminarnego wypływu gazu z dyszy korelować przy pomocy zależności zapisanej poniżej [patrz równanie (8)]:

$$\frac{L_F}{d} = A \cdot Re^{2/3} \cdot Fr^{1/3} \quad (8)$$

W literaturze można znaleźć wiele korelacji dotyczących określenia parametru L_F w zależności od parametrów charakteryzujących pożar strumieniowy. Są one odniesione do liczb Reynoldsa i Froude'a w postaci standardowej lub zmodyfikowanej.

Przy czym głównie wykorzystuje się zmodyfikowaną liczbę Froude'a, która jest opisana zależnością (9):

$$Fr_f = \frac{u_{fuel} \cdot f_s^{3/2}}{\left(\frac{\rho_{fuel}}{\rho_\infty}\right)^{0,25} \cdot \left[\frac{\Delta T_{ad}}{T_\infty} \cdot g \cdot d\right]^{0,5}} \quad (9)$$

gdzie:

f_s – parametr obliczany dla mieszaniny stechiometrycznej obliczanej dla substratów reakcji spalania w następujący sposób [patrz równanie (10)]:

$$f_s = \frac{1}{\left(\frac{\dot{m}_{air}}{\dot{m}_{fuel}}\right)_s + 1} \quad (10)$$

Delichatsios¹⁰ zaproponował dwie korelacje na określenie bezwymiarowej długości płomienia L_F/d w zależności od reżimu, w jakim zachodzi reakcja spalania. Przy czym korelacje wyrażone wzorami (11–12) bazują na zmodyfikowanych liczbach Froude'a.

Dla zmodyfikowanych liczb Froude'a $Fr_f < 5$ zaproponowana została korelacja [patrz równanie (11)]:

$$\frac{L_F}{d} = 13,5 \cdot \frac{\left(\frac{\rho_{fuel}}{\rho_\infty}\right)^{0,5} \cdot Fr_f^{0,4}}{\left[1 + 0,07 \cdot Fr_f^2\right]^{0,2} \cdot f_s} \quad (11)$$

Dla liczb Froude'a $Fr_f \geq 5$ proponuje się równanie (12):

$$\frac{L_F}{d} = 23 \cdot \frac{\left(\frac{\rho_{fuel}}{\rho_\infty}\right)^{0,5}}{f_s} \quad (12)$$

⁹ V.K. Baev, P. P. Kuznetsov i in., dz. cyt.

¹⁰ M.A. Delichatsios, *Transition from Momentum to Buoyancy-Controlled Turbulent Jet Diffusion Flames and Flame Height Relationships*, „Combustion and Flame” 1993, 92(4), s. 349–364.

Kalghatgi¹¹ badał, jak wpływa prędkości gazu na wylocie z dyszy na zjawisko oderwania płomienia od dyszy oraz jak zmienia się długość płomienia. Badania prowadzone były dla wodoru, etylenu i propanu. Z kolei Sato i in.¹² badali wpływ średnicy dyszy oraz natężenia strumienia masowego na długość płomienia gazu. Wyniki badań opublikowanych przez Sato i in. prowadzono dla metanu, propanu oraz mieszanin tych dwóch gazów.

Podczas symulacji CFD istotną kwestią jest rozgraniczenie, w jakim obszarze przebiega pożar w zależności od parametrów procesowych. Obliczeniowa mechanika płynów nie jest idealną metodą pozwalającą na obliczenie dowolnych zjawisk w przyrodzie w oparciu o modele matematyczne. Obecnie nie istnieje jeden model matematyczny pozwalający określić skrajnie różne zjawiska w przyrodzie. Należy bardzo ostrożnie podchodzić do nieweryfikowanych doświadczalnie wyników obliczeń CFD, ponieważ mogą niedokładnie opisywać rzeczywisty przebieg symulowanego procesu. Może tak się zdarzyć, ponieważ model matematyczny ukryty w metodzie objętości skończonych pozwala na otrzymanie wyników przybliżonych w oparciu o warunki brzegowe i początkowe, ale nie pozwala przewidzieć zachowania się płomienia w przypadku, gdy warunki te ulegną zmianie. Po drugie, obliczeniowa mechanika płynów bazuje na obliczeniach przybliżonych, a nie dokładnych, i ewentualne modele matematyczne powinny być poddane weryfikacji doświadczalnej. Po trzecie, jeżeli można uprościć obliczenia, to należy z tego skorzystać. W przypadku gdy badania doświadczalne jasno pokazują, że dla dużych liczb Reynoldsa pożar strumieniowy nie zależy od sił ciężkości, to należy tę informację wykorzystać w obliczeniach CFD.

3. Symulacje numeryczne CFD

Obliczeniowa mechanika płynów pozwala na symulacje nagłego uwolnienia substancji niebezpiecznej, jaką jest pożar strumieniowy. Modelowanie matematyczne przy pomocy CFD w odniesieniu do procesu spalania, gdy paliwo nie jest wstępnie wymieszane z tlenem, może być prowadzone przy pomocy dwóch odrębnych modeli matematycznych.

Pierwszy model bazuje na modelowaniu matematycznym reakcji spalania przy pomocy zależności podanej przez Magnussena i Hjertagera¹³. Procedurę obliczeń realizuje model matematyczny o nazwie *Eddy Dissipation*, w którym główny wpływ na szybkość reakcji mają wiry burzliwe. Modelowanie procesu spalania odbywa się

¹¹ G. Kalghatgi, *Lift-off Heights and Visible Lengths of Vertical Turbulent Jet Diffusion Flames in Still Air*, „Combustion Science and Technology” 1984, 41(1/2), s. 17–29.

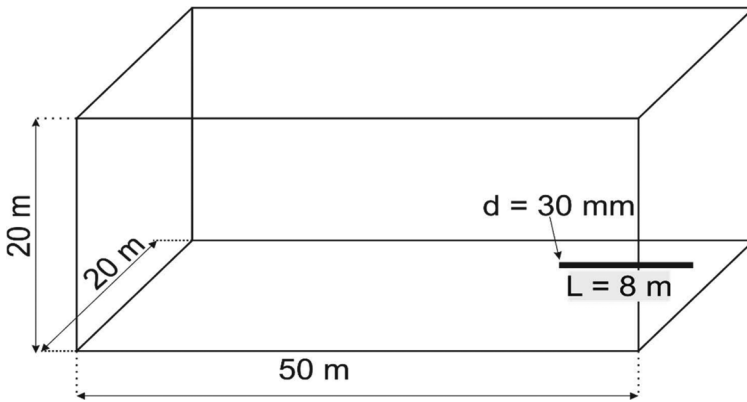
¹² H. Sato, K. Amagai, M. Arai, *Diffusion Flames and Their Flickering Motions Related with Froude Numbers under Various Gravity Levels*, „Combustion and Flame” 2000, 123(1–2), s. 107–118.

¹³ B. Magnussen, B. Hjertager, *On Mathematical Modeling of Turbulent Combustion With Special Emphasis on Soot Formation and Combustion*, „Symposium (International) on Combustion” 1977, 16, 1, s. 719–729.

przy pomocy modelu matematycznego opisującego zamknięcie bilansu pędu. Równanie dotyczące członu szybkości reakcji w przepływach burzliwych podane przez Magnussena jest funkcją zmiennych wykorzystywanych w modelu matematycznym zamykającym bilans pędu. W drugim podejściu opis procesu spalania w pożarach strumieniowych realizuje model matematyczny o nazwie *Non-Premixed Combustion*. Model ten opisuje proces spalania za pomocą jednego parametru określającego ułamek masowy paliwa. Przy wykorzystaniu funkcji gęstości prawdopodobieństwa określany jest proces spalania gazu. W tej pracy do opisu pożaru strumieniowego wybrano model *Eddy Dissipation*.

3.1 Siatka numeryczna

Do symulacji numerycznych wybrany został obszar bez budynków i przeszkód terenowych. Pożar generowany był przez dyszę o średnicy $d = 30$ mm i długości $L = 8$ m. Dysza była umieszczona 1 m nad powierzchnią ziemi (patrz ryc. 3). Obszar przestrzeni wyznaczony do symulacji miał 20 m szerokości, 20 m wysokości i 50 m długości. Wybór geometrii do analizy numerycznej został podyktowany przez jednego z konsorcjantów (Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwpożarowej), który był odpowiedzialny za wykonanie pomiarów doświadczalnych na poligonie.

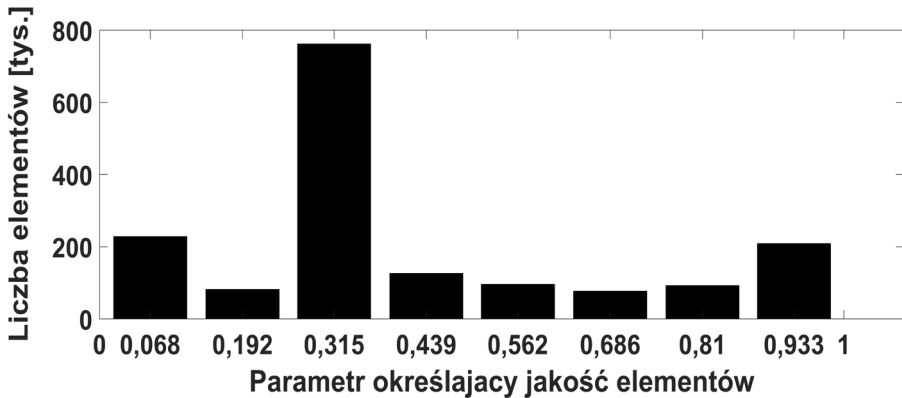


Ryc. 3. Schemat obszaru, w którym prowadzono obliczenia CFD

Źródło: opracowanie własne.

Z tego względu wykonano prostą geometrię, w której znajdowała się tylko dysza pomiarowa. Z uwagi na bezpieczeństwo prowadzenia pomiarów doświadczalnych pożar miał być wykonywany w porze nocnej przy bezwietrznych warunkach pogodowych. Ponadto temperatura powietrza musiała wynosić powyżej 15°C . Pomiarzy miały być prowadzone w warunkach bezdeszczowych. Wobec tego określono następujące warunki brzegowe: powierzchnie boczną dyszy oraz podłoże okre-

ślono jako warunek *wall*. Wylot z dyszy ustawiono jako warunek *velocity inlet*. Takie podejście podyktowane było tym, że pomiary miały być prowadzone w zakresie liczby *Macha* $Ma < 0,3$. Na pozostałych powierzchniach ustawiono warunki brzegowe jako *pressure outlet*. Dość istotną kwestią podczas nakładania siatki numerycznej na obszar jest jej gęstość. Im gęstsza siatka (mniejsze rozmiary pojedynczych elementów), tym lepsze odwzorowanie geometrii, ale dłuższy czas potrzebny na wykonanie obliczeń. Symulowanie procesu spalania przy wykorzystaniu modelu matematycznego *Eddy Dissipation* wymaga przeprowadzenia obliczeń numerycznych dla układu czternastu równań różniczkowych cząstkowych. To pokazuje skalę zapotrzebowania na „moc obliczeniową” komputerów realizujących to zadanie. Dokładając do tego spory obszar przestrzeni, jaki musi zostać uwzględniony podczas symulacji, pojawia się istotny problem numeryczny. Im gęstsza siatka, tym subtelniej odwzorowane problemy transportu pędu, masy i energii w obszarze silnej turbulencji. Ze wzrostem liczby elementów, z jakich składa się siatka, mocno nieliniowo rośnie czas potrzebny na przeprowadzenie obliczeń. Dodatkowo, zbyt duża gęstość siatki numerycznej powoduje pojawienie się tzw. dyfuzji numerycznej, która prowadzi do rozbieżności numerycznej a tym samym uniemożliwia uzyskanie rozwiązania. W związku z tym siatkę numeryczną przygotowano dwuetapowo. W pierwszym etapie wykonano siatkę numeryczną zbudowaną z 1 672 300 czworościennych elementów.

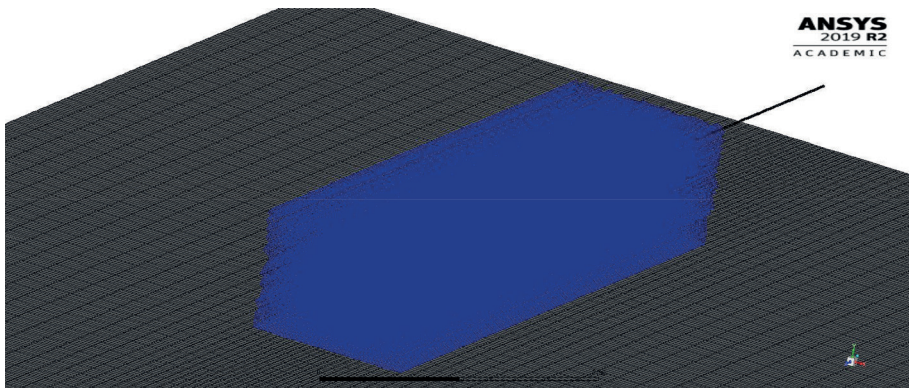


Ryc. 4. Rozkład w domenie obliczeniowej parametru określającego jakość numeryczną poszczególnych elementów siatki

Źródło: opracowanie własne.

Jakość wykonanej siatki była kontrolowana w oparciu o parametr określający jakość numeryczną poszczególnych elementów. W pierwszym etapie tworzenia siatki najniższa wartość parametru określającego jego jakość numeryczną wynosiła 0,068. Jest to wartość pozwalająca na prowadzenie zbieżnych obliczeń numerycznych. Na ryc. 4 przedstawiony został rozkład parametru określającego jakość

numeryczną w całej objętości siatki. Z tego zestawienia wynika, że zdecydowana większość elementów (około 762 tys.) miała parametr równy 0,315, co jest bardzo dobrym wynikiem. Elementów o zdecydowanie najmniejszych wartościach parametru określającego jakość numeryczną było ok. 228 tys. (patrz ryc. 4), co stanowi 13,6% całej objętości. Niestety, objętość o najniższej wartości parametru jakości numerycznej siatki przypada na obszar osi płomienia, dlatego należało przeprowadzić adaptację gradientową siatki w oparciu o gradient temperatury. W związku z tym na wstępnie wykonanej siatce przeprowadzone zostały obliczenia numeryczne pożarów strumieniowych dla zadanych warunków podawania gazu. Dzięki temu możliwe było szacunkowe określenie rozmiarów płomienia. Pozwoliło to na przeprowadzenie procedury zagęszczenia siatki w odpowiednio wybranym fragmencie przestrzeni. Na ryc. 5 w kolorze niebieskim oznaczono fragment obszaru, który został poddany adaptacji siatki przy pomocy gradientu temperatury. Takie postępowanie pozwoliło na uzyskanie lepszej zbieżności numerycznej obliczeń, niestety kosztem zwiększonego czasu potrzebnego na uzyskanie tej zbieżności. W wyniku przeprowadzenia całej procedury zagęszczania siatki liczba jej elementów wzrosła do 3 060 400 czterościennych brył. Należy nadmienić, że w tym miejscu skupia się istota problemu modelowania matematycznego CFD pożarów strumieniowych, a więc: rozmiar siatki, jej odpowiedni stopień dyskretyzacji oraz wybór modeli matematycznych pozwalających prawidłowo przeprowadzić symulacje CFD. Przydatne informacje na temat modelowania matematycznego pożarów przy pomocy obliczeniowej mechaniki płynów można znaleźć w pracy Toliasa¹⁴.



Ryc. 5. Przedstawienie fragmentu domeny obliczeniowej poddanej zagęszczeniu

Źródło: opracowanie własne.

¹⁴ I. Toliás, S. Giannissi i in., *Best Practice Guidelines in Numerical Simulations And CFD Benchmarking for Hydrogen Safety Applications*, „International Journal of Hydrogen Energy” 2019, 44(17), s. 9050–9062.

Złożoność problemu od strony modelu matematycznego jest na tyle duża, że nie jest łatwo uzyskać zbieżność numeryczną. Problem zbieżności dodatkowo utrudnia zapotrzebowanie na „moc obliczeniową” komputerów. Dodając do tego spory obszar przestrzeni, jaki jest przedmiotem modelowania matematycznego, nietrudno jest zrozumieć, dlaczego obliczenia tego typu są pracochłonne i wymagają wysokich nakładów finansowych.

3.2 Model matematyczny opisujący proces spalania

W symulacjach numerycznych procesów zachodzących w reżimie przepływu burzliwego wykorzystane zostało uśrednianie zaproponowane przez Reynoldsa. Dzięki temu każdą wielkość fizyczną opisującą transport pędu, masy i energii można traktować jako sumę dwóch wielkości: średniej i fluktuacji. Układ równań opisujący bilans pędu i masy w płynach newtonowskich może być zapisany w następujący sposób [w równaniach (13–20) zastosowano konwencję sumacyjną Einsteina i pominięto znak nad wielkościami średnimi jednej zmiennej]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \cdot u_i) = 0 \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \cdot u_i \cdot u_j) = \\ & = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \cdot \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \end{aligned} \quad (14)$$

Układ równań opisujący bilans pędu w przepływie burzliwym zapisano w postaci zależności (13–14)¹⁵. Do zamknięcia równań bilansu pędu i masy wykorzystany został model matematyczny zaproponowany przez Langtry¹⁶. Model ten opisuje zjawisko burzliwości przy pomocy czterech wielkości skalarnych i jest przez autorów proponowany do modelowania matematycznego procesów spalania. Model matematyczny jest wyrażony przez cztery równania różniczkowe cząstkowe¹⁷ [patrz równania (15–18)]:

¹⁵ R. Averaging, 4.2.2 Reynolds (Ensemble) Averaging, <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node46.htm> [dostęp: 12.02.2020].

¹⁶ R. Langtry, F. Menter, *Correlation-Based Transition Modeling for Unstructured Parallelized Computational Fluid Dynamics Codes*, „AIAA Journal” 2009, 47(12), s. 2894–2906.

¹⁷ *The Langtry-Menter 4-equation Transitional SST Model*, https://turbmodels.larc.nasa.gov/langtrymenter_4eqn.html [dostęp: 12.02.2020].

$$\frac{\partial(\rho\kappa)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \kappa)}{\partial x_j} = \widehat{P}_\kappa - \widehat{D}_\kappa + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\kappa \mu_t) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] \quad (15)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \\ & = P_\omega - D_\omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\frac{\partial(\rho\gamma)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \gamma)}{\partial x_j} = P_\gamma - E_\gamma + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_f} \right) \frac{\partial \gamma}{\partial x_j} \right] \quad (17)$$

$$\frac{\partial(\rho \widehat{Re}_{\theta t})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \widehat{Re}_{\theta t})}{\partial x_j} = P_{\theta t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\sigma_{\theta t} (\mu + \mu_t) \frac{\partial \widehat{Re}_{\theta t}}{\partial x_j} \right] \quad (18)$$

Do opisu matematycznego bilansu energii wykorzystywana była zależność:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right) + S_h \quad (19)$$

$$(\tau_{ij})_{eff} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \cdot \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \quad (20)$$

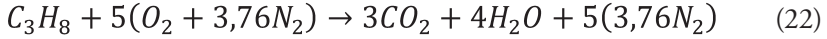
Bilans energii [patrz równania (19–20)] zapisano przy pomocy zależności zapisanych powyżej¹⁸. Bilans masy i -tego składnika w odniesieniu do $n-1$ składników mieszaniny opisany był zależnością¹⁹:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (21)$$

¹⁸ 4.4.7 Convective Heat and Mass Transfer Modeling in the $k-\epsilon$ Models, <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node64.htm> [dostęp: 12.02.2020].

¹⁹ Species Transport Equations, <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node128.htm> [dostęp: 12.02.2020].

Spalanie propanu podczas pożaru strumieniowego w obecności powietrza można wyrazić przez reakcję nieodwracalną:



Do symulacji numerycznych założono, że proces spalania propanu zachodzi w obszarze burzliwym, wobec czego na szybkość reakcji decydujący wpływ będzie miał czynnik burzliwy wyrażony równaniami podanymi przez Magnussena²⁰. Dzięki temu możliwe było uproszczenie obliczeń bilansu dla $n-1$ składników mieszaniny przez usunięcie członu Arrheniusa z równania określającego szybkość reakcji chemicznej spalania w przepływie turbulentnym. Analiza prac dotyczących modelowania matematycznego procesów spalania przy pomocy obliczeniowej mechaniki płynów potwierdza, że opis reakcji przy pomocy zależności podanej przez Magnussena bardzo dobrze odzwierciedla rzeczywisty przebieg reakcji. Bilans energii transportowanej za pomocą mechanizmu promieniowania opisano wykorzystując model matematyczny *Discrete Ordinates (DO) Radiation*²¹.

Dość istotną kwestią podczas symulacji przepływów burzliwych przy pomocy metod CFD jest określenie wszystkich zmiennych charakteryzujących przepływ na wlocie do domeny obliczeniowej. Do symulacji numerycznych zastosowano zależność pozwalającą obliczyć intensywność turbulencji w oparciu o liczbę Reynoldsa²². W celu poprawnego opisu warunków brzegowych dla przepływu burzliwego zastosowano następujące założenia. Pierwsze założenie dotyczyło wyboru odpowiedniej korelacji opisującej intensywność turbulencji. W literaturze można znaleźć zależności opisujące wpływ liczby Reynoldsa na intensywność turbulencji podczas przepływów płynów w rurach²³. Z uwagi na fakt, że w projekcie EVARIS modelowano matematycznie pożar w otwartej przestrzeni postanowiono zastosować korelację dostępną w literaturze²⁴, która często jest używana podczas symulacji CFD:

$$I = \frac{0,16}{Re_d^{1/8}} \quad (23)$$

Wykorzystując prędkość gazu na wylocie z dyszy o średnicy d oraz zależność (23) $I = f(Re_d)$, wyznacza się wartości zmiennych określających przepływ burzliwy na wlocie do domeny obliczeniowej. Wszystkie potrzebne zależności zostały przedstawione przy pomocy równań (24–26):

$$\kappa_{intet} = 1,5 \cdot (u_{fuel} \cdot I)^2 \quad (24)$$

²⁰ B. Magnussen, B. Hjertager, dz. cyt.

²¹ *Discrete Ordinates (DO) Radiation Model Theory*, <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node115.htm> [dostęp: 12.02.2020].

²² *Determining Turbulence Parameters*, <http://jullio.pe.kr/fluent6.1/help/html/ug/node178.htm> [dostęp: 12.02.2020].

²³ F. Russo, N. Basse, *Scaling of Turbulence Intensity For Low-Speed Flow in Smooth Pipes*, „Flow Measurement and Instrumentation” 2016, 52, s. 101–114.

²⁴ *Turbulence Intensity*, https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_intensity [dostęp: 12.02.2020].

$$\varepsilon_{inlet} = C_{\mu}^{0,75} \cdot \frac{(\kappa)^{1,5}}{\ell} \quad (25)$$

$$\omega_{inlet} = \frac{(\kappa)^{0,5}}{C_{\mu}^{0,25} \cdot \ell} \quad (26)$$

Drugie założenie pozwalające określić warunki wlotowe gazu potrzebne do opisanie zmiennych charakteryzujących przepływ burzliwy dotyczy charakterystycznej skali burzliwości ℓ odniesionej do długości [patrz równanie (27)]. Kody CFD do wyznaczenia tej wielkości bazują na koncepcji drogi mieszania podczas transportu pędu w wirach burzliwych. W literaturze odnaleźć można kilka zależności pozwalających określić parametr ℓ przy pomocy średnicy hydraulicznej²⁵. W tej pracy przyjęto zależność często wykorzystywaną w obliczeniowej mechanice płynów:

$$\ell = 0,07 \cdot d \quad (27)$$

3.3 Wyniki symulacji numerycznych

Celem tej pracy jest przedstawienie metody, którą wykorzystano do symulacji pożarów strumieniowych przy pomocy obliczeniowej mechaniki płynów na potrzeby projektu EVARIS. Głównym celem prac grupy badawczej z Politechniki Warszawskiej była weryfikacja doświadczalna modeli matematycznych oraz kodów CFD przy pomocy badań doświadczalnych wykonywanych przez grupę z Centrum Naukowo-Badawczego Ochrony Przeciwpożarowej. Sama weryfikacja doświadczalna będzie przedmiotem publikacji naukowych w czasopiśmie „Przemysł Chemiczny”, niemniej jednak podejście pokazane w tej części monografii poświęconej projektowi może być pomocne. Wszystkie założenia projektowe wykorzystywane do symulacji CFD były podyktowane względami bezpieczeństwa, wobec czego niektóre założenia mogą być dyskusyjne, np. bardzo prosta geometria, brak wpływu warunków meteorologicznych czy duża czystość gazu użytego do obliczeń. Rzeczywisty proces nie będzie przebiegał w takich warunkach, jednakże wyniki prac przedstawione w tym rozdziale posłużyły do budowy narzędzia programistycznego, które jest głównym celem projektu EVARIS.

W tej części opracowania ukazane zostaną wyniki jednej symulacji numerycznej wykonanej w siatce, którą przedstawiono wcześniej (patrz ryc. 5). W tabeli 1 zamieszczono wartości parametrów opisujących właściwości gazu na wlocie do bilansowanego obszaru. Wartość liczby Reynoldsa dla gazu opuszczającego dyszę oznacza, że przepływ odbywa się w zakresie rozwiniętego przepływu burzliwego. Podobnie wartości liczby Froude'a świadczą o tym, że można korzystać z korelacji

²⁵ *Turbulence Length Scale*, https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_length_scale [dostęp: 12.02.2020].

podanej w pracy Shevyakov i Komov²⁶ w pierwszym zakresie jej obowiązywania. Prowadzi to do wniosku, że siły ciężkości mogą mieć wpływ na długość płomienia. Wartość ciśnienia gazu oraz temperatury na wylocie z dyszy podyktowana została przez wytyczne do badań poligonowych.

Tabela 1. Parametry procesowe określające warunki brzegowe na wylocie z dyszy

PRĘDKOŚĆ PROPANU u_{fuel}	TEMPERATURA PROPANU	LICZBA FROUDE'A Fr	LICZBA REYNOLDSA Re	CIŚNIENIE PROPANU P
[m/s]	[K]	[-]	[-]	[Pa]
40	300	5436,629	116018,68	101325

Źródło: opracowanie własne.

Symulacje CFD wymagają od użytkownika sprawdzenia, na ile rozwiązanie numeryczne jest prawidłowe z punktu widzenia bilansów masy, pędu i energii. W przypadku braku weryfikacji danych pochodzących z obliczeń CFD przy pomocy danych pochodzących z badań doświadczalnych, podstawową metodą weryfikacji wyników jest sprawdzenie bilansów masy i energii w domenie obliczeniowej. W tabeli 2 przedstawione zostały wyniki bilansu masy odniesione do brzegów domeny obliczeniowej. Bilans masy w momencie zakończenia obliczeń zamykał się na wartościach rzędu milionowych części strumienia masowego. Świadczy to o tym, że bilans pędu i bilans masy odniesiony do wszystkich składników jest spełniony z bardzo małym błędem.

Tabela 2. Wyniki bilansu masy w domenie obliczeniowej

NAZWA POWIERZCHNI	STRUMIEŃ MASY [kg/s]
inlet1	0,049795796
pressure_outlet1	4,9976741
pressure_outlet2	1,9296454
pressure_outlet3	-12,469698
pressure_outlet4	4,9964554
pressure_outlet5	0,49611949
wall_1	0
wall_2	0
Bilans masy	-7,814E-6

Źródło: opracowanie własne.

²⁶ G. Shevyakov, V. Komov, dz. cyt.

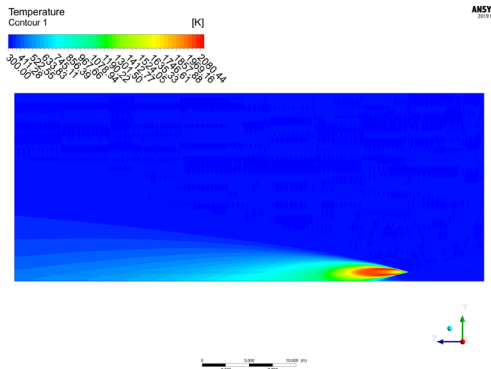
Obliczenia numeryczne prowadzone były iteracyjnie. Oznacza to, że metodą objętości skończonych na każdym kroku całkowania bilansuje się pęd, masę i energię. Symulację numeryczną zaprezentowaną w tej pracy zakończono, gdy bilans energii w domenie obliczeniowej został spełniony z odpowiednio małym błędem. Jak wynika z analizy danych ujętych w tabeli 3, rozwiązanie jest zbieżne numerycznie, ponieważ bilans energii spełniony jest z dobrą dokładnością (patrz ostatni wiersz w tabeli 3). Analizując oba bilanse, trzeba przyznać, że zakończenie obliczeń numerycznych w momencie określonym przez oba bilanse jest jak najbardziej poprawne. Symulacje CFD pozwoliły na osiągnięcie zbieżności obliczeń, a więc wyniki otrzymane przy tej symulacji mogą być analizowane na potrzeby projektu EVARIS.

Tabela 3. Wyniki bilansu energii w domenie obliczeniowej

NAZWA POWIERZCHNI	STRUMIEŃ ENERGII [J/s]
inlet1	-117235,23
pressure_outlet1	-348746,05
pressure_outlet2	-373316,43
pressure_outlet3	1344101,3
pressure_outlet4	-349117,45
pressure_outlet5	-155689,39
wall_1	0
wall_2	0
Bilans masy	-3,225

Źródło: opracowanie własne.

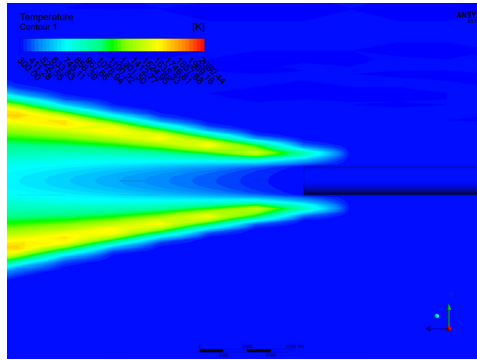
Na ryc. 6 zaprezentowano wyniki symulacji CFD dla warunków procesowych określonych w tabeli 1. Przedstawiony został rozkład temperatury w przestrzeni prostopadłej do podłoża przecinającej dyszę na pół. Widzimy charakterystyczny kształt temperatury przypominający elipsę.



Ryc. 6. Rozkład temperatury w przekroju prostopadłym do podłoża

Źródło: opracowanie własne.

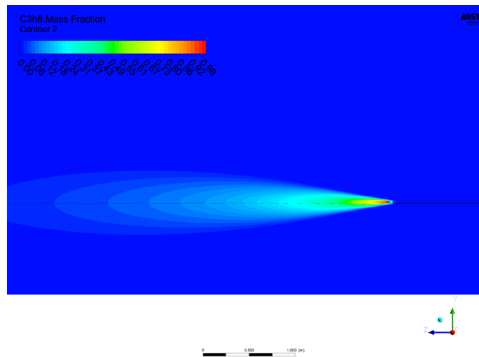
Z analizy literatury tematu wynika, że rozkład temperatury zamieszczony na ryc. 6 nie odwzorowuje w stosunku 1:1 kształtu płomienia, mimo to kształt jest zależny również od pola temperatury, choć jego rozmiary definiowane są w oparciu o ułamek masowy paliwa. Najwyższe wartości temperatury notowane są na linii pokrywającej się z osią dyszy. Przy czym temperatura gazów preakcyjnych w osi dyszy spada poniżej 1000 K w odległości nieco ponad 8 m od wyloty gazu z dyszy. O poprawności przyjętego modelu świadczy fakt odwzorowania zjawiska oderwania płomienia od dyszy, które zostało zaprezentowane na ryc. 7. Widoczny jest obszar o temperaturze równej temperaturze otoczenia. Świadczy to o braku przebiegu reakcji chemicznej, ponieważ w tym obszarze brakuje tlenu.



Ryc. 7. Rozkład temperatury w obszarze oderwania płomienia

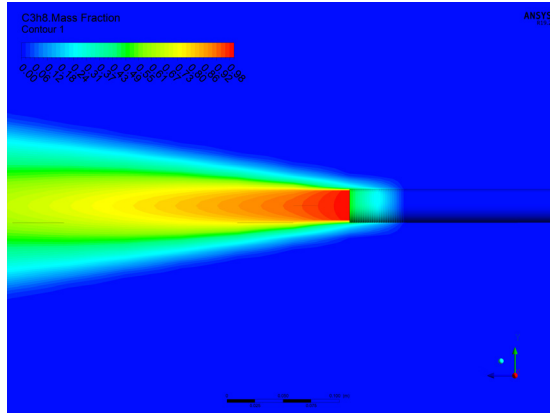
Źródło: opracowanie własne.

Kształt płomienia może być określony jak na ryc. 8, która przedstawia profil ułamka masowego propanu w rozpatrywanym obszarze. Na ryc. 8 widoczna jest charakterystyczna elipsa związana z kształtem płomienia. Podobnie widok na ryc. 9 potwierdza poprzednie wnioski związane z brakiem tlenu w obszarze zerwania płomienia.



Ryc. 8. Rozkład ułamka masowego propanu w przekroju prostopadłym do podłoża

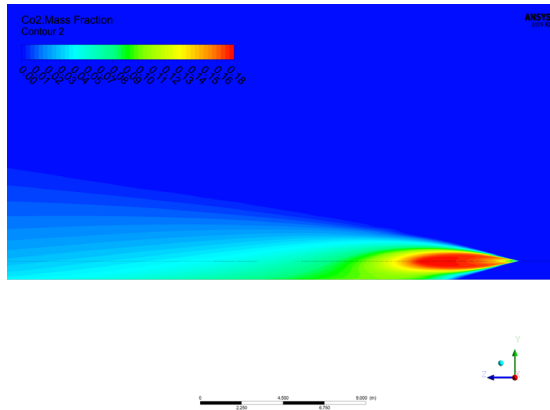
Źródło: opracowanie własne.



Ryc. 9. Rozkład ułamka masowego C_3H_8 w pobliżu dyszy

Źródło: opracowanie własne.

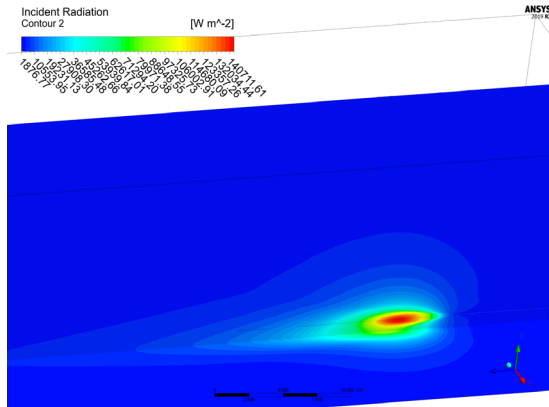
Na ryc. 10 pokazano wyniki zmian ułamka masowego dwutlenku węgla w istotnych obszarach przestrzeni.



Ryc. 10. Rozkład ułamka masowego CO_2 w przekroju prostopadłym do podłoża

Źródło: opracowanie własne.

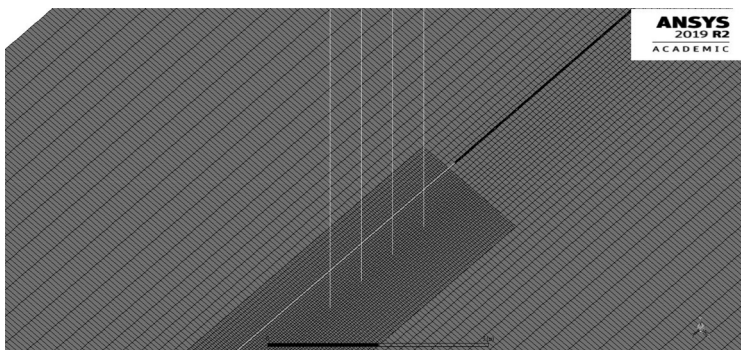
Kolejną ważną wielkością charakteryzującą pożar jest gęstość strumienia ciepła przekazywanego przez promieniowanie (patrz ryc. 11). Znajomość tej wielkości w przestrzeni jest kluczowa podczas tworzenia scenariuszy awaryjnych, ponieważ wielkość ta ma bezpośredni wpływ na zdrowie i życie ludzi znajdujących się w pobliżu pożaru. Promieniowanie ciepłe podczas pożaru jest również niebezpieczne, jak wzrost temperatury. Dodatkowo mechanizm transportu ciepła przez promieniowanie jest bardziej efektywny niż mechanizm konwekcyjny, wobec czego może stwarzać większe zagrożenie, w większej odległości od źródła pożaru.



Ryc. 11. Rozkład gęstości strumienia ciepła przekazywanego przez promieniowanie w przekroju prostokątnym do podłoża

Źródło: opracowanie własne.

W celu określenia rozmiarów płomienia oraz rozkładów temperatury zebrano wartości ważnych wielkości z pięciu linii umiejscowionych w przestrzeni. Na ryc. 12 pokazano rozmieszczenie linii w domenie obliczeniowej, które posłużyło do określenia rozkładów temperatur w przestrzeni. W tabeli 4 ujęto współrzędne przestrzenne dla każdej linii w obszarze, w którym prowadzono obliczenia numeryczne. Linia 1 została umiejscowiona poziomo na wysokości $Z = 1$ m, jej kierunek pokrywa się z osią dyszy, przez którą podawany jest propan (patrz linia pozioma – ryc. 12). Linia 2, linia 3, linia 4 i linia 5 umieszczone zostały pionowo od powierzchni ziemi do końca obszaru obliczeniowego (patrz ryc. 12 – linie pionowe). Linie 2 umiejscowiono w odległości 1 m od wylotu gazu z dyszy, każdą kolejną ustawiono o jeden metr dalej od poprzedniej linii pomiarowej (patrz linie pionowe – ryc. 12). Dzięki temu zebrane zostały rozkłady ułamka masowego oraz temperatury w obszarze przestrzeni zajętej przez płomień.



Ryc. 12. Rozmieszczenie linii pomiarowych w domenie obliczeniowej

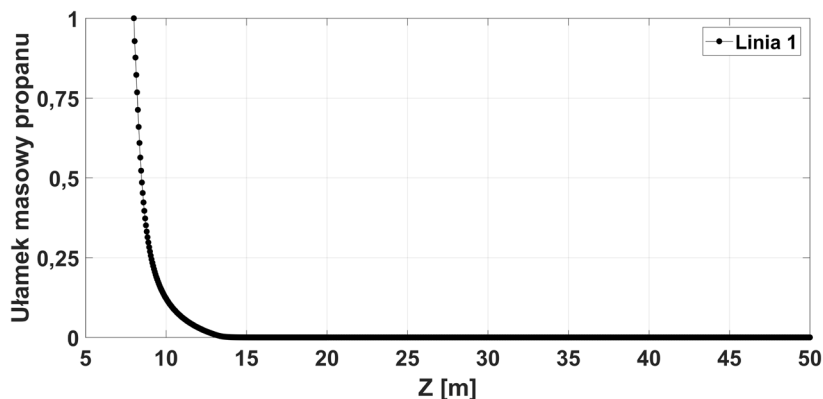
Źródło: opracowanie własne.

Tabela 4. Współrzędne rozmieszczenia linii pomiarowych w domenie obliczeniowej

NAZWA	X [m]	Y [m]	Z [m]
Linia 1	0	1	<8–50>
Linia 2	<0–20>	0	9
Linia 3	<0–20>	0	10
Linia 4	<0–20>	0	11
Linia 5	<0–20>	0	12

Źródło: opracowanie własne.

Na ryc. 13 pokazano rozkład ułamka masowego propanu wzdłuż linii 1. Stężenie propanu spada w wyniku reakcji spalania gazu. Można oszacować strefę mieszania oraz długość płomienia. Strefa mieszania w pożarze strumieniowym oznacza miejsce w przestrzeni, w którym nie zachodzi reakcja spalania. Wobec czego zakłada się, że jest to obszar, w którym ułamek masowy paliwa jest większy lub równy 0,99. Natomiast obszar, w którym wartość ułamka masowego propanu spadnie poniżej 0,01 oznacza koniec obszaru zajętego przez płomień. W oparciu o obie wielkości wyznacza się charakterystyczne wymiary płomienia. W literaturze podejście oparte o założenia podane powyżej można znaleźć w pracy McGrattana²⁷ i Ma²⁸. Parametry L_F i s posłużą do wyznaczenia wielkości charakteryzujących rozmiar płomienia w pożarze strumieniowym podczas symulacji numerycznych CFD. Dodatkowo obie wartości zostaną porównane z danymi zawartymi w literaturze (patrz tabela 5).

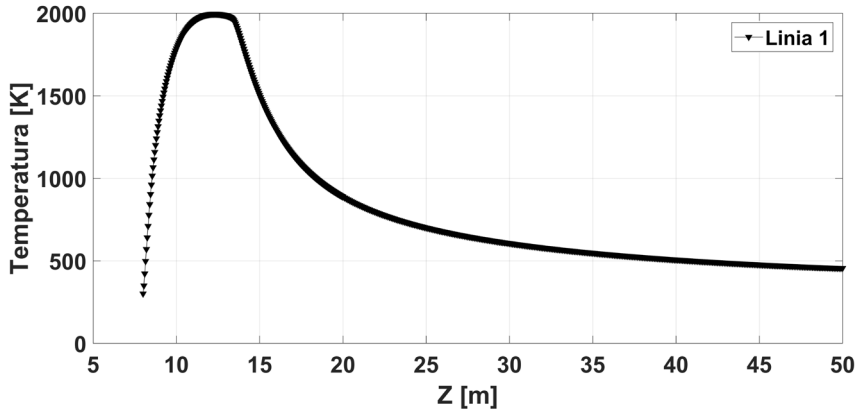


Ryc. 13. Rozkład ułamka masowego propanu w osi dyszy wzdłuż linii 1 (por. tabela 4)

Źródło: opracowanie własne.

²⁷ K. McGrattan, R. McDermott, J. Floyd, S. Hostikka, G. Forney, H. Baum, *Computational Fluid Dynamics Modelling of Fire*, „International Journal of Computational Fluid Dynamics” 2012, 26, s. 349–361. doi:10.1080/10618562.2012.659663.

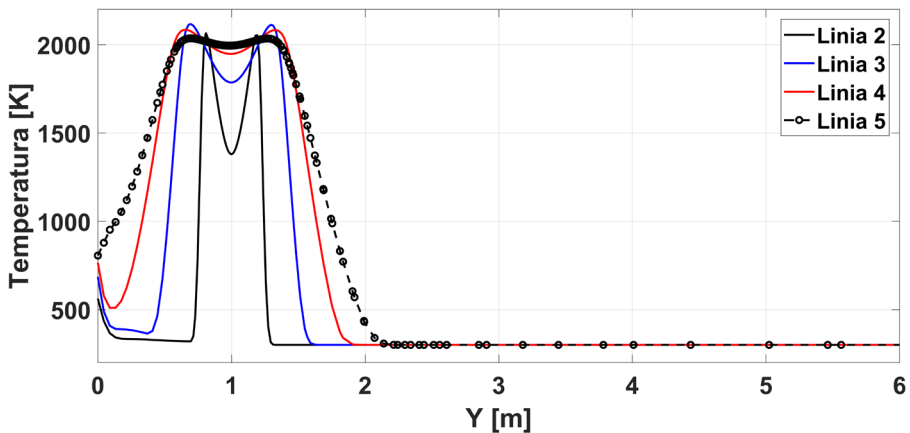
²⁸ T.G. Ma, J.G. Quintiere, *Numerical Simulation of Axi-Symmetric Fire Plumes: Accuracy and Limitations*, „Fire Safety Journal” 2003, 38, s. 467–492. doi:10.1016/S0379-7112(02)00082-6.



Ryc. 14. Rozkład temperatury w osi dyszy wzdłuż linii 1

Źródło: opracowanie własne.

Rycina 15 ilustruje, że płomień nie ma kształtu idealnie symetrycznego tak jak to pokazują modele analityczne. Obszar wysokiej temperatury w odniesieniu do współrzędnej pionowej jest zdecydowanie największy dla linii 5. Im dalej od wylotu propanu, tym większy obszar wysokich temperatur. Jest to spowodowane tym, że pożar rozwija się nie tylko w kierunku pokrywającym się z kierunkiem wypływu propanu z dyszy (współrzędna Z), ale i w kierunku pionowym (współrzędna Y). Również siły ciężkości mają wpływ na dynamikę pożaru strumieniowego.



Ryc. 15. Rozkład temperatury w zależności od współrzędnej pionowej wzdłuż linii pomiarowych (por. tabela 4)

Źródło: opracowanie własne.

W tabeli 5 zestawiono porównanie dwóch wielkości charakteryzujących płomień z wartościami otrzymanymi przy pomocy korelacji (parametr L_F) i z danymi do-

świadczalnymi (parametr s) podanymi przez Kalghatgi²⁹ oraz Molkova³⁰. W tabeli 5 zestawiono wyniki symulacji numerycznych oraz wartości otrzymane z korelacji podanej przez Kalghatgi oraz Molkova. Z analizy tego porównania widać, że parametr L_F zdecydowanie odbiega od wartości zaproponowanej w korelacji podanej w pracy Kalghatgi³¹ (patrz tabela 5). Nieco lepiej odwzorowany jest parametr s , chociaż i tu rozbieżności są dość znaczne. W tym miejscu pojawia się podstawowy problem modelowania matematycznego. Korelacje literaturowe oparte są o badania doświadczalne wykonywane na ogół w małej skali. W tym przypadku rozpatrywano problem pożaru strumieniowego w skali rzeczywistej. A zatem średnica dyszy, z której podawano propan do obszaru obliczeniowego, była dużo większa niż średnice użyte podczas badań doświadczalnych. Autorzy tej pracy nie dotarli do publikacji naukowych, w których badano doświadczalnie zjawisko pożaru strumieniowego podczas spalania propanu prowadzonego przy użyciu dyszy o średnicy zbliżonej do wartości użytej w symulacji. Najprawdopodobniej z przyczyn bezpieczeństwa prowadzenie badań w takich warunkach, jak symulacja tu przedstawiona, jest dość trudne i wymaga odpowiednio dużych nakładów finansowych, co mogło mieć wpływ na brak danych literaturowych. Autorzy analizując literaturę dotyczącą zagadnienia pożarów strumieniowych nie spotkali się z wynikami badań, w których dysza pomiarowa była większa niż 10.1 mm podczas badań dla propanu³². Z tego względu wartość parametru s w kolumnie trzeciej tabeli 5 dotyczy dużo mniejszej średnicy dyszy niż ta, która była określona w symulacji CFD. To może mieć wpływ na istotne rozbieżności w obu wartościach. Z uwagi na fakt prowadzenia badań poligonowych z użyciem dyszy o średnicy 30 mm, taki wymiar użyty został do symulacji. Z porównania korelacji literaturowych z danymi z obliczeń CFD płynie ważny wniosek. Korelacje literaturowe, często stosowane w modelach matematycznych szeroko wykorzystywanych przez oprogramowanie typu ALOHA itp., mogą prowadzić do przeszacowania rozmiarów płomienia. Niemniej jednak, przeszacowanie jest zdecydowanie lepszym wynikiem niż niedoszacowanie rozmiarów płomienia. Szczególnie, jeżeli określa się obszary bezpieczeństwa oraz oblicza parametry prawdopodobieństwa zagrożenia.

Tabela 5. Porównanie wyników CFD z korelacjami dostępnymi w literaturze

WYMIARY CHARAKTERYSTYCZNE	CFD	KORELACJE
s [mm]	50	70 (Kalghatgi, 1984)
L_F [m]	4,95	2,64 (Molkov i Saffers, 2013)

Źródło: opracowanie własne.

²⁹ Kalghatgi G., *Lift-off Heights and Visible Lengths of Vertical Turbulent Jet Diffusion Flames in Still Air*, „Combustion Science and Technology” 1984, 41(1/2), s. 17–29.

³⁰ Molkov V., Saffers J.-B., *Hydrogen Jet Flames*, „International Journal of Hydrogen Energy” 2013, 38(19), s. 8141–8158.

³¹ G. Kalghatgi, dz. cyt.

³² jw.

4. Podsumowanie

W ramach badań numerycznych wykonano szereg symulacji CFD dotyczących modelowania matematycznego zjawisk nagłego uwolnienia substancji niebezpiecznej do atmosfery. W wyniku tych symulacji powstały modele matematyczne pozwalające opisywać ww. zjawiska w zależności od warunków procesowych. Projekt EVARIS miał na celu zbudowanie w miarę przyjaznego środowiska programistycznego, pozwalającego na symulowanie przebiegu nagłego uwolnienia substancji niebezpiecznej w powietrzu. W ramach tego projektu porównywano ze sobą modele analityczne oraz modele numeryczne jednowymiarowe, dwuwymiarowe i wielowymiarowe. Z tego porównania jasno wynika, że zdecydowanie najlepiej opisują przebieg procesu modele matematyczne wielowymiarowe. Niestety, modele matematyczne tej grupy wymagają bardzo pracochłonnych obliczeń numerycznych, dlatego ich wykorzystanie w tworzonym narzędziu programistycznym nie jest możliwe. Jednakże, modele matematyczne wielowymiarowe mogą znaleźć zastosowanie do weryfikacji scenariuszy podczas zmiennych warunków brzegowych. Jak pokazano w tej pracy, pożar strumieniowy może być symulowany z powodzeniem przy pomocy metod CFD. Obliczeniowa mechanika płynów umożliwia zaawansowany opis matematyczny zjawiska spalania gazów w powietrzu. Metody CFD pozwalają odwzorować zjawiska, które występują podczas pożarów strumieniowych. Ponadto należy mieć na uwadze, że korelacje literaturowe opisujące wymiary płomienia mogą nie oszacowywać poprawnie wymiarów płomienia. Korelacje te są bardzo często stosowane w prostych modelach matematycznych. Jak pokazano w tym rozdziale monografii poświęconej projektowi EVARIS, obliczeniowa mechanika płynów ma duże znaczenie podczas określania stref bezpieczeństwa w trakcie pożarów strumieniowych. Z perspektywy projektu EVARIS modelowanie CFD pozwala na uchwycenie subtelnych różnic w obszarze płomienia, niemniej jednak, na ogół porównanie modeli analitycznych z CFD pokazuje, że te drugie przeszacowują obszary niebezpieczne. A zatem z punktu widzenia bezpieczeństwa jest to korzystniejsze, ponieważ większy obszar przestrzeni zostanie uznany za niebezpieczny.

Literatura

- Averaging R., 4.2.2 Reynolds (Ensemble) Averaging, <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node46.htm> [dostęp: 12.02.2020].
- Baev V.K., Kuznetsov P.P. i in., *Length of Diffusion Flames*, „Combustion, Explosion, and Shock Waves” 1974, 10(4).
- 4.4.7 Convective Heat and Mass Transfer Modeling in the $k - \epsilon$ Models, <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node64.htm> [dostęp: 12.02.2020].

- Delichatsios M.A., *Transition from Momentum to Buoyancy-Controlled Turbulent Jet Diffusion Flames and Flame Height Relationships*, „Combustion and Flame” 1993, 92(4).
- Determining Turbulence Parameters*, <http://jullio.pe.kr/fluent6.1/help/html/ug/node178.htm> [dostęp: 12.02.2020].
- Discrete Ordinates (DO) Radiation Model Theory*, <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node115.htm> [dostęp: 12.02.2020].
- Kalghatgi G., *Lift-off Heights and Visible Lengths of Vertical Turbulent Jet Diffusion Flames in Still Air*, „Combustion Science and Technology” 1984, 41(1/2).
- Langtry R., Menter F., *Correlation-Based Transition Modeling for Unstructured Parallelized Computational Fluid Dynamics Codes*, „AIAA Journal” 2009, 47(12).
- Ma T.G., Quintiere J.G., *Numerical Simulation of Axi-Symmetric Fire Plumes: Accuracy and Limitations*, „Fire Safety Journal” 2003, 38.
- Magnussen B., Hjertager B., *On Mathematical Modeling of Turbulent Combustion With Special Emphasis on Soot Formation and Combustion*, „Symposium (International) on Combustion” 1977, 16, 1.
- McGrattan K., McDermott R., Floyd J., Hostikka S., Forney G., Baum H., *Computational Fluid Dynamics Modelling of Fire*, „International Journal of Computational Fluid Dynamics” 2012, 26.
- Molkov V., Saffers J.-B., *Hydrogen Jet Flames*, „International Journal of Hydrogen Energy” 2013, 38(19).
- Russo F., Basse N., *Scaling of Turbulence Intensity For Low-Speed Flow in Smooth Pipes*. „Flow Measurement and Instrumentation” 2016, 52.
- Sato H., Amagai K., Arai M., *Diffusion Flames and Their Flickering Motions Related with Froude Numbers under Various Gravity Levels*, „Combustion and Flame” 2000, 123(1–2).
- Shevyakov G., Komov V., *Effect of Noncombustible Admixtures on Length of an Axisymmetric On-Port Turbulent Diffusion Flame*, „Combustion, Explosion, and Shock Waves” 1977, 13.
- Species Transport Equations*, <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node128.htm> [dostęp: 12.02.2020].
- The Langtry-Menter 4-equation Transitional SST Model*, https://turbmodels.larc.nasa.gov/langtrymenter_4eqn.html [dostęp: 12.02.2020].
- Tolias I., Giannisi S. i in., *Best Practice Guidelines in Numerical Simulations And CFD Benchmarking for Hydrogen Safety Applications*, „International Journal of Hydrogen Energy” 2019, 44(17).
- Turbulence Intensity*, https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_intensity [dostęp: 12.02.2020].
- Turbulence Length Scale*, https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_length_scale [dostęp: 12.02.2020].

ROZDZIAŁ V.

METODYKA IDENTYFIKACJI MOŻLIWOŚCI POWSTANIA EFEKTU DOMINO

Mieczysław Borysiewicz, Ewa Kowalik-Pilarska,
Grzegorz Siess, Henryk Wojciechowicz
Narodowe Centrum Badań Jądrowych

1. Wprowadzenie

Dostępne w ostatniej dekadzie metodologie oraz oprogramowanie do oszacowania efektów domino spowodowanych przez obciążenie cieplne lub nadciśnienie dla urządzeń przemysłowych są oparte na modelach wykorzystujących funkcje probitowe¹. Obecnie nie istnieje powszechnie akceptowana definicja obejmująca ogół zjawisk typu domino w zakładach przemysłowych, aczkolwiek wielu autorów dostarcza przydatnych do ich opisu informacji. Zdarzenia typu domino można określić jako obejmujące wypadki, w których wydarzenie początkowe rozprzestrzenia się na będące w pobliżu urządzenia (jednostki), wyzwalaając jeden lub więcej wypadków wtórnych, w sumie o bardziej dotkliwych skutkach niż ewentualne konsekwencje samego wypadku inicjującego².

Pojęcie eskalacji dotyczy procesów, które prowadzą do zniszczeń własności materialnej (materiały, sprzęty, układy przemysłowe, ekosystemy) oraz ucierpienia ludności podczas propagacji efektu domino (w trakcie jego eskalacji zwiększają się szkody). Zatem uważa się, że w obszarze przemysłowym każde zdarzenie rozprzestrzeniające się od jednostki wyposażenia i/lub jednostki przemysłowej do kolejnych jednostek lub z jednego miejsca do innego miejsca powinno zostać zaklasyfikowane jako zdarzenie domino³.

Przedstawiona w niniejszym rozdziale metodyka oparta jest w dużej mierze na zaleceniach zawartych w szeregu wytycznych dotyczących zapobiegania poważnym awariom, opracowanych na potrzeby COMAH, która jest brytyjską wersją dyrektywy SEVESO II oraz na wyczerpujących informacjach zawartych w artykule F. Kadri, E. Chatelet i P. Lallement pt. *The Assessment of Risk Caused by Fire and Explosion in Chemical Process Industry: A Domino Effect-Based Study* opublikowanym w 2013 r. w „Journal of Risk Analysis and Crisis Response”.

¹ F. Kadri, E. Chatelet, P. Lallement, *The Assessment of Risk Caused by Fire and Explosion in Chemical Process Industry: A Domino Effect-Based Study*, „Journal of Risk Analysis and Crisis Response” 2013, 3(2), s. 66–76.

² jw.

³ jw.

2. Zdarzenia domino

2.1 Cechy zdarzeń typu domino

Zgodnie z przykładowymi, przeanalizowanymi zdarzeniami typu domino z przeszłości, u wszystkich sekwencji wypadkowych z nimi związanych występowały następujące trzy czynniki:

1. Pierwotny scenariusz wypadkowy, który zainicjował sekwencję zdarzeń typu domino.
2. Propagacja pierwotnego zdarzenia, związana z wektorami jego eskalacji, generowana przez efekty fizyczne pierwotnego scenariusza, w wyniku której ucierpiał przynajmniej jeden wtórny obiekt.
3. Jeden lub więcej wtórnych scenariuszy wypadkowych lub zdarzeń, włączając w to jednostki tej samej lub innej instalacji, powodujące propagację zdarzenia pierwotnego⁴.

Potencjalne źródła efektów domino mają zróżnicowaną naturę oraz są związane z różnymi początkowymi wydarzeniami. Generalnie różnicuje się je ze względu na charakter ryzyka, to czy jest ono związane z czynnikami naturalnymi czy z antropogenicznymi. W tej ostatniej kategorii zawarte są ryzyka związane z zagadnieniami technologicznymi i sprawami organizacyjnymi (nieumyślnymi) – jednak w celu przestudiowania efektu domino, należy brać pod uwagę kombinację obu wymienionych rodzajów ryzyka⁵.

2.2 Rozgraniczenie rodzajów ryzyka ze względu na jego pochodzenie

W związku z powyższymi informacjami zaproponowano następujące rozgraniczenie rodzajów ryzyka ze względu na jego pochodzenie⁶:

1. Ryzyko pochodzenia naturalnego (głównie pochodzenia geologicznego i/lub atmosferycznego):
 - a) pochodzenia klimatycznego: pożary lasów, wylewy i powodzie, lawiny, huragany i tornada, sztormy;
 - b) pochodzenia geologicznego: obsunięcie się i trzęsienia ziemi, tsunami, erupcje wulkanów oraz inne emisje naturalne (gazów i innych materiałów)⁷.
2. Ryzyko pochodzenia antropogenicznego (błędy organizacyjne i działania umyślnie wrogie):
 - a) pochodzenia organizacyjnego: błędy ludzkie (niepoprawnie przeprowadzone działania, brak potrzebnych działań ludzkich), błędy w planach, procedurach oraz/lub organizacji;

⁴ jw.

⁵ jw.

⁶ jw.

⁷ jw.

- b) działania umyślnie wrogie: kradzieże, sabotaż oraz/lub działania motywowane zemstą, szkody związane z jakimkolwiek atakiem. Tego typu działania mogą dotyczyć materiałów, ale także osobistych lub wrażliwych danych⁸;
- c) ryzyko pochodzenia technologicznego (pożary, eksplozje oraz uwolnienia substancji toksycznych⁹).

W przypadku pożarów może być to: pożar rozlewisk, dyfuzyjne spalanie chmury par, pożar kulisty lub pożar strumieniowy.

Ogień jest możliwym wektorem eskalacji typu domino zaistniałej, czy to poprzez rozprzestrzenianie się ognia czy przez promieniowanie cieplne. Czynniki mające wpływ na każdy z powyższych typów eskalacji związanych z ogniem zostały przedstawione poniżej.

Czynniki istotne dla rozprzestrzenienia się ognia to:

- dostępność drogi propagacji dla ognia/spalania materiału/gazu/płynu (na przykład otwarte przestrzenie, drogi, naturalne lub antropogeniczne kanały drenażowe, odpływy),
- bliskość materiałów palnych,
- obecność lub brak ścianek przeciwpożarowych,
- rowy, wały, spadki, bundy, krawężniki zapobiegające rozprzestrzenianiu się płonących cieczy (efekty topograficzne),
- efekty przeskoku,
- aktywna prewencja przeciwpożarowa – jest możliwa, jeżeli rozprzestrzenianie się ognia jest stopniowe,
- efekty rozprzestrzeniania się ognia wraz z wiatrem,
- opóźnienie zapłonu uwolnionych substancji łatwopalnych, które może spowodować znaczącą eskalację zjawisk/efektów domino,
- przewiew blisko ognia,
- połączenia pomiędzy instalacjami.

W tym kontekście pojawia się pytanie, czy zdarzenia „rozprzestrzeniania się ognia” powinny zostać zaklasyfikowane jako zdarzenia typu domino. Ogień może się rozprzestrzeniać wraz z przepływem płonącej cieczy z jednego obszaru instalacji do drugiego, gdzie powoduje dalsze powstawanie niebezpiecznych zdarzeń. Ogień może rozprzestrzeniać się także poprzez dalsze spalanie dostępnych materiałów palnych. Nie jest kwestią oczywistą, czy tego typu zdarzenia są prostą eskalacją zdarzeń wypadkowych czy też jest to efekt domino. Prawdopodobieństwo tego typu wypadków, zaistniałych poprzez zapalenie okolicznej roślinności, może zostać zminimalizowane poprzez regularne stosowanie środków chwastobójczych. Tak samo możliwość rozprzestrzenienia ognia z powodu zapalenia zewnętrznych

⁸ jw.

⁹ W.S. Atkins, *Safety & Reliability for Health and Safety Executive, Development of Methods to Assess the Significance of Domino Effects from Major Hazard Sites*. Contract Research Report, 1998, 189/1998; F. Kadri, E. Chatelet, P. Lallement, dz. cyt., s. 66–76.

zapasów paszy, produktów lub materiałów odpadowych może zostać zmniejszona poprzez uważne i prawidłowe nimi gospodarowanie.

Analogiczne czynniki dotyczące możliwej eskalacji dla promieniowania cieplnego to:

- pasywna ochrona przeciwpożarowa;
- wały przeciwpożarowe;
- linia fizycznej ochrony za pomocą działań ubocznych struktur niezwiązanych z działaniami ochronnymi (blokowanie przez inne struktury, zbiorniki, ściany);
- aktywna ochrona przeciwpożarowa (woda, gaśnice pianowe);
- ładunek ognia (intensywność i czas trwania);
- spalanie w pochodni/zbiorniku do zrzutu, służące do redukcji zapasu uwalnianego materiału¹⁰.

W przypadku eksplozji mamy do czynienia z: eksplozjami ograniczonej chmury par (*confined vapor cloud explosions* – CVCE), BLEVE (*boiling liquid expanding vapor explosion*), eksplozjami generowanymi poprzez ciśnienia w ciągach wentylacyjnych określanymi jako tzw. *vented explosion*, VCE (*vapor cloud explosion*), eksplozjami pyłów oraz mechanicznymi.

Eksplozje mogą być wektorami eskalacji efektu domino poprzez oddziaływanie strumienia podciśnienia oraz wybuchu. Czynniki dotyczące każdego z tych oddziaływań zostały wymienione poniżej.

Czynniki istotne dla strumienia podciśnienia to:

- wały ochronne,
- osłona poprzez inne instalacje/zbiorniki,
- efekty wzmocnienia uderzenia strumienia podciśnienia,
- wzmocnienia zbiorników,
- grubość zbiornika,
- zawalenie się materiału powyżej analizowanego celu,
- orientacja celu względem fali podciśnienia,
- waga zawartości (wyposażenia) zbiornika.

Czynniki istotne dla wybuchu to:

- minimalna masa/szybkość niezbędna do spowodowania szkód,
- trajektoria wybuchu,
- kształt wybuchu (na przykład powierzchnia oporu, współczynnik oporu, obszar podniesienia, obszar wpływu),
- grubość zbiornika/konstrukcja materiału,
- ochrona przez inne struktury,
- brak potrzeby rozpatrywania efektu wybuchu na obszarach całkowicie zniszczonych przez falę podciśnienia,

¹⁰ W.S. Atkins, *Safety & Reliability for Health and Safety Executive*, dz. cyt.; F. Kadri, E. Chatelet, P. Lallement, dz. cyt., s. 66–76.

- rozkład wielkości zbiorników,
- rozmiar/długość zbiornika,
- liczba połączonych przewodów¹¹.

Dla uwolnień toksycznych substancji chemicznych należy rozważyć uwolnienia z punktów przetwórczych lub przechowalniczych oraz wypadki w czasie transportu.

Czynniki istotne dla skutków uwolnień toksycznych oraz ich udział w eskalacji domino zostały wymienione poniżej.

Czynniki istotne dla dyspersji to:

- natychmiastowe, krótkotrwałe lub ciągłe uwolnienie,
- prędkość i kierunek wiatru,
- warunki pogodowe.

Czynniki ważne dla skutków działania substancji szkodliwych to:

- wpływ na operatorów/działania straży pożarnej,
- zależność od sposobu działania instalacji,
- możliwość bezpiecznego wyłączenia instalacji w sytuacji wystąpienia problemu,
- mechanizm błyskawicznego wyłączenia w instalacji docelowej (na przykład za pomocą jednego przycisku),
- przerwanie ryzykownych operacji, na przykład opróżnienie zbiornika,
- systemy kontroli dotkniętych uwolnieniem instalacji, manualne lub automatyczne,
- dostęp do substancji toksycznej (szczególnie do sterowni lub centrów planowania kryzysowego),
- instrukcje postępowania przeciwdziałającego awarii.

Uwolnienia toksyczne powodują eskalację domino tylko wtedy, gdy ich skutki dotkną operatorów innych instalacji lub gdy uniemożliwią operatorom/strażakom przeciwdziałanie początkowemu uwolnieniu przed zainfekowaniem innych obszarów¹².

Wymienione rodzaje ryzyka mogą być ze sobą łączone, co znacząco komplikuje analizę zjawisk domino. W tabeli 1 ujęto różnego rodzaju zdarzenia pierwotne inicjujące efekt domino oraz ich połączenia z innego rodzaju zdarzeniami wtórnymi. Czasami znacząco zróżnicowana natura kilku rodzajów ryzyka obejmuje także różne procesy jego propagacji. Prowadzi to również do wykorzystywania odmiennych metod ich analizy (metody deterministyczne, probabilistyczne oraz analizy ilościowej). Proces propagacji jest wprost związany z potencjalnymi źródłami zagrożenia i zdarzeniami inicjującymi, ale także z ich bezpośrednim otoczeniem (obszarem zagrożonym). Propagację opisują procesy fizykochemiczne oraz informacyjne, których tok ewolucji charakteryzują aktualne warunki: fizyczne (atmosferyczne, geologiczne, hydrologiczne) oraz materialne (budynki, tereny,

¹¹ W.S. Atkins, *Safety & Reliability for Health and Safety Executive*, dz. cyt.; F. Kadri, E. Chatelet, P. Lallement, dz. cyt., s. 66–76.

¹² jw.

udogodnienia, drogi), ekologiczne (wegetacja, fauna), informacyjne (detekcja, obserwacje oraz systemy informacyjne) i związane z czynnikiem ludzkim (zachowania indywidualne, organizacja i logistyka, lokalna demografia)¹³.

Tabela 1. Macierz zdarzeń typu domino

ZDARZENIA POCZĄTKOWE	ZDARZENIA DOMINO (WTÓRNE)					
	BLEVE	POŻAR KULISTY	EKSPLOZJA	POŻAR ROZLEWISK/ POŻAR STRUMIENIOWY	DYFUZYJNE SPALANIE CHMURY PAR	UWOLNIENIE TOKSYCZNE
BLEVE	analizowane oddzielnie	rozszerzony kontur zagrożenia	analizowane oddzielnie	analizowane oddzielnie	analizowane oddzielnie	analizowane oddzielnie
POŻAR KULISTY	analizowane oddzielnie	rozszerzony kontur zagrożenia	analizowane oddzielnie	analizowane oddzielnie	analizowane oddzielnie	analizowane oddzielnie
EKSPLOZJA	możliwy wzrost liczby ofiar śmiertelnych	możliwy wzrost liczby ofiar śmiertelnych	możliwy wzrost liczby ofiar śmiertelnych	możliwy wzrost liczby ofiar śmiertelnych	możliwy wzrost liczby ofiar śmiertelnych	możliwy wzrost liczby ofiar śmiertelnych
POŻAR ROZLEWISK/ POŻAR STRUMIENIOWY	analizowane oddzielnie	analizowane oddzielnie	analizowane oddzielnie	analizowane oddzielnie	analizowane oddzielnie	analizowane oddzielnie
DYFUZYJNE SPALANIE CHMURY PAR	analizowane oddzielnie	analizowane oddzielnie	analizowane oddzielnie	analizowane oddzielnie	analizowane oddzielnie	analizowane oddzielnie
UWOLNIENIE TOKSYCZNE	możliwy wzrost liczby ofiar śmiertelnych	analizowane oddzielnie	możliwy wzrost liczby ofiar śmiertelnych	możliwy wzrost liczby ofiar śmiertelnych	możliwy wzrost liczby ofiar śmiertelnych	możliwy wzrost liczby ofiar śmiertelnych

Źródło: W.S. Atkins W.S., *Safety & Reliability for Health and Safety Executive. Development of Methods to Assess The Significance of Domino Effects from Major Hazard Sites*. Contract Research Report, 1998, 189/1998.

Ryzyko eksplozji lub pożaru, charakteryzowane w ramach struktur analiz efektu domina, poprzez możliwości wystąpienia wypadku na terenie przemysłowym, może prowadzić do szkód i poważnych konsekwencji dla otaczającego wyposażenia, osób, dóbr materialnych oraz środowiska. Te ostatnie mogą generować następujące cztery główne wydarzenia, które z kolei mogą spowodować lub wpływać na zaburzenia w otaczających jednostkach lub instalacjach przemysłowych:

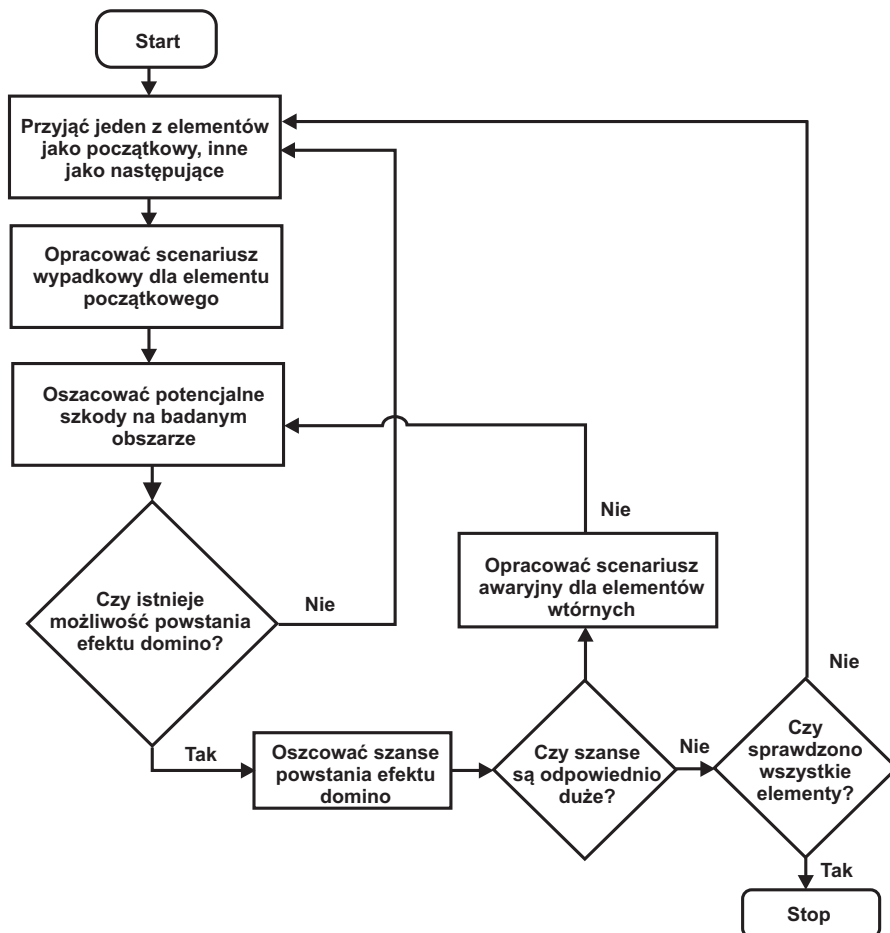
- 1) nadciśnienie/fala uderzeniowa,
- 2) obciążenie cieplne,
- 3) wyrzut odłamków (pocisków),
- 4) uwolnienia substancji toksycznych.

¹³ jw.

3. Schematy zdarzeń domino i postępowania w przypadku ryzyka ich wystąpienia

3.1 Schematy przykładowego toku analizy efektów domino oraz modele postępowania w analizie zdarzeń efektów domino

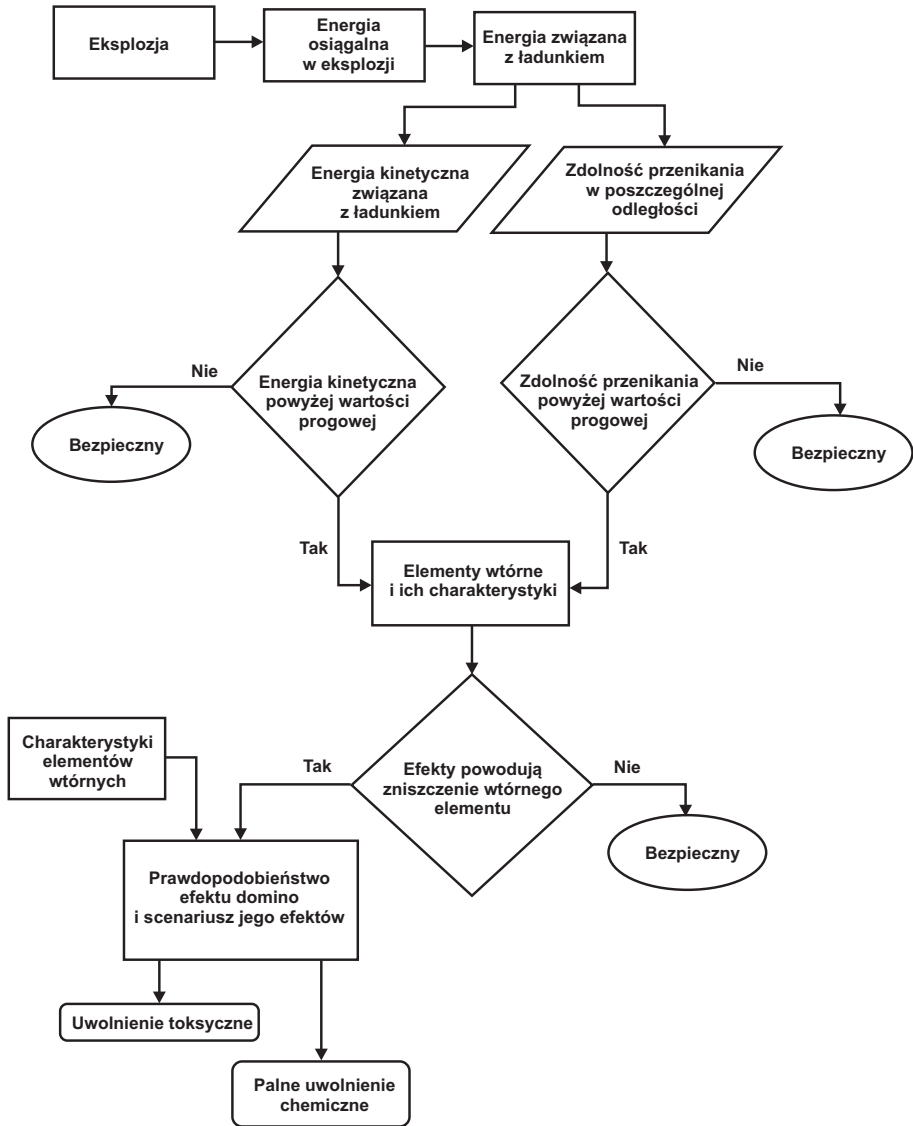
Rycina 1 przedstawia przykładowy tok analizy efektów domino, z kolei ryc. 2–4 ukazują modele postępowania w analizie zdarzeń typu domino, w zależności od rodzaju wydarzenia inicjującego¹⁴.



Ryc. 1. Schemat procedury analizy efektów domino

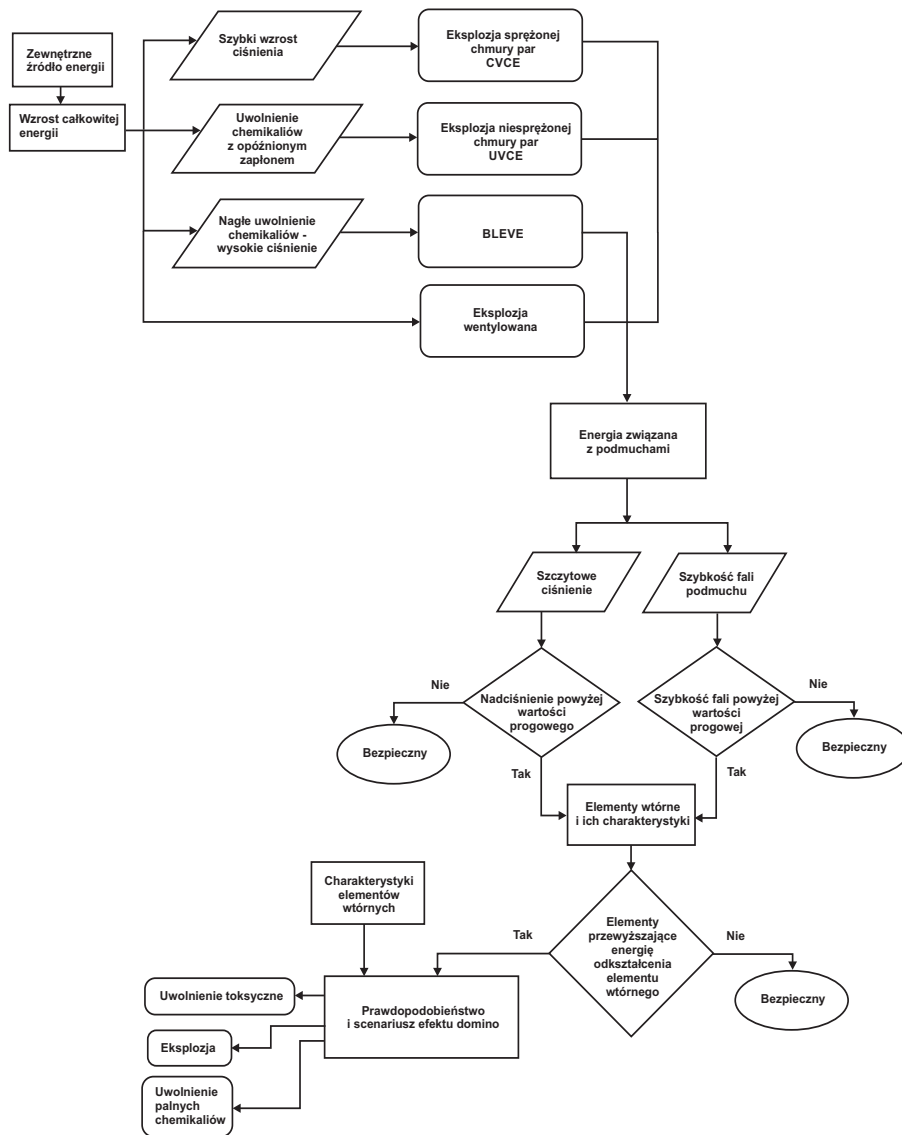
Źródło: V.P. Singh, P. Singh, K. Haritashya, *Studies on Chain of Accidents (Domino Effect)*, „Process Safety” 2000, 19(1), Spring, s. 40–56.

¹⁴ F. Kadri, E. Chatelet, P. Lallement, dz. cyt., s. 66–76.



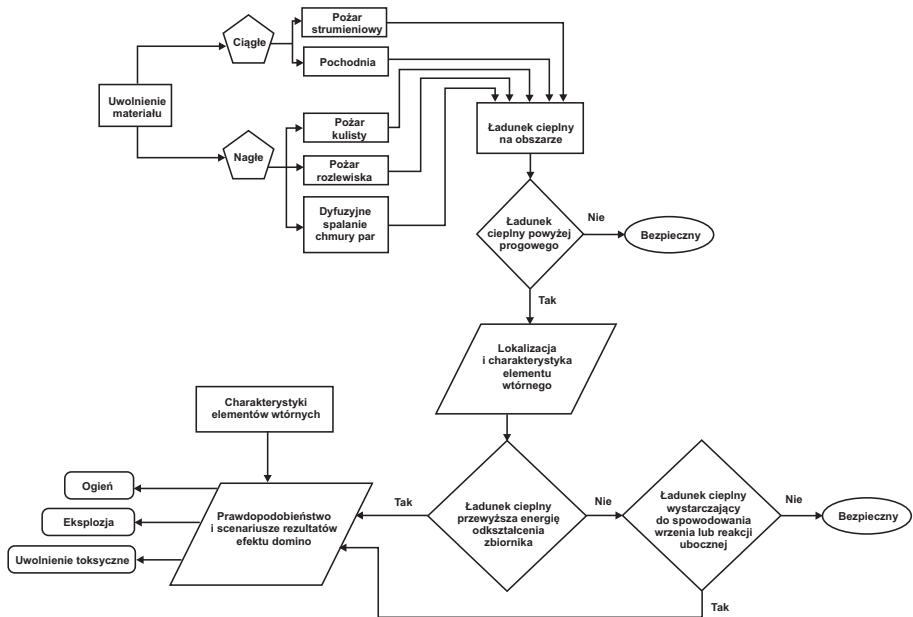
Ryc. 2. Schemat modelu efektu domino przy zdarzeniu inicjującym typu eksplozji

Źródło: V.P. Singh, P. Singh, K. Haritashya, *Studies on Chain of Accidents (Domino Effect)*, „Process Safety” 2000, 19(1), Spring, s. 40–56.



Ryc. 3. Schemat modelu efektu domino przy zdarzeniu inicjującym w postaci fali uderzeniowej

Źródło: V.P. Singh, P. Singh, K. Haritashya, *Studies on Chain of Accidents (Domino Effect)*, „Process Safety” 2000, 19(1), Spring, s. 40–56.



Ryc. 4. Schemat modelu efektu domino przy zdarzeniu inicjującym w postaci ognia

Źródło: V.P. Singh, P. Singh, K. Haritashya, *Studies on Chain of Accidents (Domino Effect)*, „Process Safety” 2000, 19(1), Spring, s. 40–56.

3.2 Funkcje dla zdarzeń typu domino

Mimo że zostały przeprowadzone badania dotyczące efektów domino powodowanych przez pożary i eksplozje, to dostępnych jest jedynie kilka modeli bazujących na bardzo uproszczonych założeniach. Służą one do szacowania strat sprzętowych związanych z obciążeniem cieplnym i nadciśnieniem w kontekście efektu domina. Część autorów proponuje przyjąć zerowe prawdopodobieństwo szkód dla sprzętów w przypadku efektów fizycznych niższych od wartości progowej wystąpienia szkody oraz przyjęcie odpowiedniego prawdopodobieństwa szkód dla efektów fizycznych przekraczających wartości progowe. Badania ilościowe nad efektami domino zostały przeprowadzone także przez Pettitt¹⁵. Wyniki tego badania prezentują możliwe podejścia do określania konsekwencji efektów domino pochodzących z wydarzeń powodujących promieniowanie cieplne. Pierwsze podejście oceniające częstość wypadków eksplozji zostało zaproponowane przez Lath, Gautam i Raghavan¹⁶. Autorzy ci wskazali metodykę przewidywania efektów domino powodowanych przez rozpryskujące się pod ciśnieniem odłamki zniszczonych sprzętów.

¹⁵ G.N. Pettitt, *Evaluating the Probability of Major Hazardous Incidents as a Result Of Escalation Events*, „Journal of Loss Prevention Process Industries” 1993, 6(1), s. 37–46.

¹⁶ P. Lath, G. Gautam, K.V. Raghavan, *Strategies for Quantification of Thermally Initiated Cascade Effects*, „Journal of Loss Prevention Process Industries” 1992, 5(1), s. 15–21.

Uproszczony model został zaproponowany przez Scilly i Crowther¹⁷. Pozwala on na określenie prawdopodobieństwa szkód materialnych spowodowanych przez falę uderzeniową. Model ten powstał na bazie „eksperymentalnych” oszacowań przemieszczania się sprzętów przy jednoczesnej ich deformacji oraz utracie ciągłości. Autorzy definiują także „funkcję probitową” (Y), łączącą szkody materialne ze szczytowym ciśnieniem statycznym (P^0), w następujący sposób¹⁸:

$$Y = a + b \times \ln(P^0) \quad (1)$$

gdzie:

Y – funkcja probitowa właściwa dla wystąpienia szkód sprzętowych,

P^0 – szczytowe ciśnienie statyczne [Pa],

b – współczynniki funkcji probitowych.

Podjęcie funkcji probitowych zostało wybrane także przez Guidelines CCPS¹⁹, Eisenberg i in²⁰, Cozzani i Salzano²¹, którzy w swoich artykułach przeanalizowali oraz sporządzili przegląd istniejących modeli w celu stworzenia modelu probabilistycznego szacowania szkód dotyczących sprzętów przemysłowych różnych kategorii. Model prawdopodobieństwa wystąpienia szkód zaproponowany przez autorów bierze pod uwagę cztery kategorie sprzętów przemysłowych (zbiorniki pod ciśnieniem równym z atmosferycznym, zbiorniki pod ciśnieniem, zbiorniki wydłużone oraz sprzęty drobne). Współczynniki funkcji probitowych oraz wartości progowe dla prawdopodobieństwa szkód związanych z falą ciśnienia dla czterech rodzajów wyposażenia przemysłowego ujęto w tabeli 2²².

Tabela 2. Współczynniki funkcji probitowych dla różnych kategorii wyposażenia przemysłowego

KATEGORIA SPRZĘTÓW	a	b	WARTOŚĆ PROGOWA
Zbiorniki pod ciśnieniem atmosferycznym	-18,96	+2,44	22 kPa
Zbiorniki pod ciśnieniem	-42,44	+4,33	16 kPa
Zbiorniki wydłużone	-28,07	+3,16	31 kPa
Sprzęty drobne	-17,79	+2,18	37 kPa

Źródło: F. Kadri, E. Chatelet, P. Lallement, *The Assessment of Risk Caused by Fire and Explosion in Chemical Process Industry: A Domino Effect-Based Study*, „Journal of Risk Analysis and Crisis Response” 2013, 3(2), s. 66–76.

¹⁷ N.G. Scilly, J.H. Crowther, *Methodologies for Predicting Domino Effects from Pressure Vessel Fragmentation*. In International Conference on Hazard Identification and Risk Analysis, Human Factors and Human Reliability in Process Safety, Florida, CCPS, AIChE, 1992, s. 15–17.

¹⁸ F. Kadri, E. Chatelet, P. Lallement, dz. cyt., s. 66–76.

¹⁹ CCPS (*Centre for Chemical Process Safety*); Guidelines for Chemical Process Quantitative Analysis, Second Edition, American Institute of Chemical Engineers, New York 2000.

²⁰ N.A. Eisenberg, C.J. Lynch, R.J. Breeding, *Vulnerability Model: A Simulation System for Assessing Damage Resulting from Marine Spills*, Report CG-D-136-75, Enviro Control Inc., Rockville, MD, 1975.

²¹ V. Cozzani, E. Salzano, *The Quantitative Assessment of Domino Effect Caused by Overpressure Part II. Case Studies*, „Journal of Hazardous Materials” 2004, A107, s. 81–94; *Supplement to Guideline – Environmental Risk Tolerability for COMAH Establishments*, Complex Site Example; Chemical and Downstream Oil Industries Forum, 1999.

²² F. Kadri, E. Chatelet, P. Lallement, dz. cyt., s. 66–76.

W celu oszacowania czasu wystąpienia awarii dla wyposażenia wystawionego na działanie ognia, został zaproponowany dobrze znany uproszczony model, także bazujący na funkcjach probitowych. Zaproponowano model prawdopodobieństwa wystąpienia szkód, który bierze pod uwagę kategorie wyposażenia przemysłowego. W tabeli 3 zestawiono wartości progowe i modele oparte na funkcjach probitowych dla dwóch kategorii wyposażenia²³.

Tabela 3. Modele prawdopodobieństwa i wartości granicznych dla promieniowania cieplnego

KATEGORIA WYPOSAŻENIA	WARTOŚCI PROGOWE	KORELACJA
Zbiorniki pod ciśnieniem atmosferycznym	15 kW/m ² τ ≥ 10 min	$Y = 12,54 - 1,847 * \ln(ttf)$ $\ln(ttf) = -1,128 * \ln(l) - 2,667 * 10^{-3}V + 9,887$
Zbiorniki pod ciśnieniem	50 kW/m ² τ ≥ 10 min	$Y = 12,54 - 1,847 * \ln(ttf)$ $\ln(ttf) = -0,947 * \ln(l) + 8,835 * V^{0,032}$

gdzie: *Y* jest funkcją probitową, *ttf* jest czasem pozostałym do wystąpienia awarii [s], *V* jest objętością zbiornika [m³], *l* jest wielkością promieniowania cieplnego otrzymanego przez zbiornik będący celem [kW/m²]

Źródło: F. Kadri, E. Chatelet, P. Lallement, *The Assessment of Risk Caused by Fire and Explosion in Chemical Process Industry: A Domino Effect-Based Study*, „Journal of Risk Analysis and Crisis Response” 2013, 3(2), s. 66–76.

Metodologia służąca do analiz efektów domino została przedstawiona w pracy Singh i in.²⁴. Autorzy wykazali, że promieniowanie cieplne na poziomie 37 kW/m² jest wystarczające do spowodowania poważnych strat w wyposażeniu przemysłowym wtórnych instalacji pracujących w warunkach atmosferycznych. Również ciśnienie szczytowe na poziomie 70 kPa jest wystarczające do spowodowania poważnych strat w sprężcie oraz jest w stanie powodować wtórne wypadki, związane z nowymi eksplozjami lub z wystąpieniem ognia. Tego typu metodologia ma na celu obliczenie prawdopodobieństwa propagacji scenariuszy pierwotnych, przewidywanych częstości wystąpienia zdarzeń typu domino oraz umożliwia oszacowanie wkładu scenariuszy efektów domino w ryzyko indywidualne oraz społeczne. W przypadku zakładów przemysłowych lub powierzchni magazynowych ładunek promieniowania cieplnego oraz nadciśnienia, spowodowany przez eksplozje BLEVE zbiorników z gazem lub silnie sprężoną cieczą, jest zagrożeniem dla otaczającego wyposażenia, a także może prowadzić do wtórnych eksplozji i pożarów. Eksplozje wrzących par BLEVE znajdują się wśród najczęstszych przyczyn poważnych awarii w przemyśle procesowym. Zwykle są związane z wybuchami zbiorników z cieciami łatwopalnymi (LPG). W związku z tym, do skutków BLEVE należy zaliczyć także te związane z pożarem kulistym, najczęściej powstającym natych-

²³ jw.

²⁴ V.P. Singh, P. Singh, K. Haritashya, *Studies on Chain of Accidents (Domino Effect)*, „Process Safety” 2000, 19(1), Spring, s. 40–56.

miast po wybuchu. Ogólnie rzecz biorąc, fizycznymi efektami tego typu eksplozji są z reguły: promieniowanie cieplne, nadciśnienie lub wyrzut odłamków. Różne wzory zostały użyte do oszacowania ilościowego promieniowania cieplnego generowanego przez ogień. Promieniowanie z pożaru kulistego lub pożaru rozlewiska otrzymywane przez receptor znajdujący się w odległości r od jego centrum może zostać opisane poprzez następujące równanie²⁵:

$$I(r) = \frac{\tau F_S D^2 m_\infty H_C}{16r^2} \quad (2)$$

gdzie:

$I(r)$ – strumień promieniowania cieplnego [kW/m²],

F_S – część promieniowania cieplnego wypromieniowanego z powierzchni płomieni,

m_∞ – szybkość spalania na jednostkę powierzchni obszaru rozlewiska [kg/(m²*s)],

τ – współczynnik przenikalności atmosfery,

H_C – ciepło spalania [kJ/kg],

D – średnica rozlewiska.

W badaniach eksplozji, do oceny potencjalnych szkodliwych efektów dla określonej ilości paliwa (węglowodoru), używa się ekwiwalentu masy TNT (mTNT). Energia spalania dostępna w chmurze pary została przekształcona w równoważnik masy TNT (kg). mTNT może zostać określony w następujący sposób: eksplodująca określona masa paliwa zachowuje się jak eksplodujące TNT w równoważnym poziomie energii. Ekwiwalent masy TNT jest szacowany za pomocą następującego równania (3)²⁶:

$$m_{TNT} = \frac{\mu m \Delta H_C}{E_{TNT}} \quad (3)$$

gdzie:

μ – efektywność eksplozji (0,03 to 0,1),

m – masa paliwa zawartego w eksplozji [kg],

ΔH_C – energia eksplozji gazu palnego (energia/masa) [MJ/kg],

E_{TNT} – energia eksplozji TNT [MJ/kg].

W eksplozji szczytowe nadciśnienie może zostać oszacowane przy użyciu równania (4)²⁷:

$$P^0(r) = \frac{1616[1 + (\frac{Z_e}{4,5})^2]}{\sqrt{1 + (\frac{Z_e}{0,048})^2} * \sqrt{1 + (\frac{Z_e}{1,32})^2} * \sqrt{1 + (\frac{Z_e}{1,35})^2}} \quad (4)$$

gdzie:

$P^0(r)$ – szczytowe ciśnienie [kPa], a ciśnienie atmosferyczne to 101,3 kPa,

²⁵ F. Kadri, E. Chatelet, P. Lallement, dz. cyt., s. 66–76.

²⁶ jw.

²⁷ jw.

z_e – wyskalowana odległość [$\text{m/kg}^{1/3}$], która może zostać obliczona przy wykorzystaniu równania (5)²⁸:

$$z_e = \frac{r}{m^{\frac{1}{3}}_{TNT}} \quad (5)$$

gdzie:

r – odległość od centrum eksplozji.

Należy zauważyć, że z_e może zostać obliczone poprzez ustalenie wartości progowej szczytowego nadciśnienia dla każdej z kategorii sprzętu²⁹.

Następnie trzeba przyrzeć się samej metodologii obliczeń dotyczących wypadków. Tereny przemysłowe oraz obszary służące do magazynowania materiałów zawierają wiele instalacji służących do przechowywania substancji będących pod ciśnieniem, które mogą ulec wewnętrznemu lub zewnętrznemu wypadkowi. Wektory eskalacji (efektów fizycznych) generowane przez przerwanie ciągłości obiektu (eksplozję) mogą dotknąć także otaczających jednostek, budynków, personelu i środowiska. Jeżeli obiekty dotknięte tymi skutkami ucierpią, mogą także później eksplodować i generować odmienne zagrożenia dla innych otaczających obiektów. Tego typu łańcuch wypadkowy to efekt domino i może on mieć katastrofalne skutki dla instalacji przemysłowej³⁰.

System objęty efektami domino definiujemy jako taki, który posiada co najmniej 2 podsystemy (S1 i S2) – podsystem źródłowy i podsystem wtórny:

- Podsystem źródłowy: zachodzący w nim wypadek może generować niebezpieczeństwo (efekt fizyczny), które może oddziaływać na otaczające podsystemy (ładunek promieniowania cieplnego, strumień nadciśnienia, odłamki, uwolnienia toksyczne).
- Podsystem wtórny: może zostać dotknięty poprzez awarię, której źródłem jest inny podsystem. Dodatkowo do wymienionych efektów fizycznych można dodać czynniki wpływające, które mogą oddziaływać lub potęgować szkody systemu wtórnego (czyny umyślnie szkodliwe, czynniki środowiskowe i organizacyjne, system interwencji i warunki pogodowe)³¹.

W przypadku analiz efektu domino awaria podsystemu uwarunkowana jest charakterystyką dynamiczną podsystemu, zależną od wektorów eskalacji (wektorów wejściowych), wartości progowych oraz wspomnianych wcześniej czynników wpływających. W związku z tym system domino może zostać opisany za pomocą następującej funkcji wektorowej³²:

²⁸ jw.

²⁹ jw.

³⁰ jw.

³¹ jw.

³² jw.

$$\vec{y} = N(\vec{x}, \vec{d}, t) \quad (6)$$

gdzie:

$\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_p)^T$ – jest wektorem rzeczywistym (wektorem wejściowym) o wymiarze p w przestrzeni stanu fizycznego w czasie t . x_i mogą zostać podzielone na dwa typy parametrów: losowe parametry fizyczne (efekty fizyczne) oraz czynniki wpływające (system interwencji i czynnik ludzki),

$\vec{d} = (d_1, d_2, \dots, d_g)^T$ – jest wektorem rzeczywistym (wektorem wejściowym) o wymiarze g , d_j reprezentuje deterministyczne parametry wejściowe systemu (charakterystyki fizyczne systemu, takie jak wartości progowe)³³,

$\vec{y} = (y_1, y_2, \dots, y_k)^T$ – jest wektorem wydajności systemu o wymiarach k , y_i jest wartością losową zależną od parametrów wejściowych³⁴.

Przy założeniu, że układ przemysłowy złożony jest z kilku podukładów (S_1, S_2, \dots, S_n), w ramach struktur analiz efektu domino, każdy z tych podukładów może zostać scharakteryzowany za pomocą trzech stanów głównych:

$$S_i \begin{cases} \text{Stan 1, stan pracy} \\ \text{Stan 2, stan osiągnięcia wartości progowych} \\ \text{Stan 3, stan awarii} \end{cases}$$

- Stan 1: w czasie normalnej pracy urządzenia wartości wyjściowe odpowiadające parametrom wejściowym układu są odpowiednio niższe od wartości progowych. W tym stanie jednostka może być pod wpływem wektora lub wektorów eskalacji, wytworzonych przez zdarzenie pierwotne.
- Stan 2: podczas gdy intensywność lub wartości wektorów eskalacji są równoważne odpowiadającym im wartościom progowym, układ zostaje dotknięty awarią.
- Stan 3: występuje wtedy, gdy wartości wektorów eskalacji przekraczają odpowiednie wartości progowe³⁵.

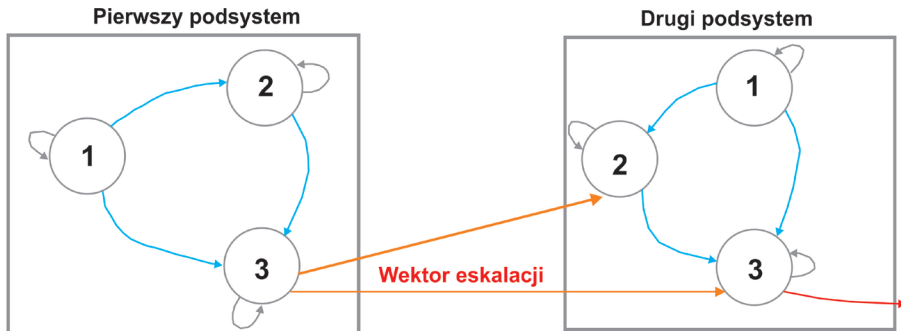
W celu zbadania sekwencji wypadkowych efektu domino, można przyjąć jako punkt początkowy awarię co najmniej jednego elementu zapoczątkowującego zdarzenie. Zgodnie z tymi założeniami, istnieje co najmniej jeden podsystem dotknięty awarią. Ryc. 5 przedstawia możliwe stany przejściowe w przypadku dwóch podsystemów³⁶.

³³ jw.

³⁴ jw.

³⁵ jw.

³⁶ jw.



Ryc. 5. Przejście między stanami

Źródło: F. Kadri, E. Chatelet, P. Lallement, *The Assessment of Risk Caused by Fire and Explosion in Chemical Process Industry: A Domino Effect-Based Study*, „Journal of Risk Analysis and Crisis Response” 2013, 3(2), s. 66–76.

Następnie należy poznać prawdopodobieństwo awarii. W czasie normalnej pracy instalacji wartości na wyjściu y_i , odpowiadające parametrom wejściowym systemu, są odpowiednio niższe od wartości progowych y_{0i} . Kiedy wartość jakiegokolwiek danej wyjściowej y_i układu dla punktu wejściowego jest wyższa niż odpowiadająca wartość progowa y_{0i} , układ jest w stanie awarii. Następnie, funkcja awaryjna opisująca stan układu może zostać zdefiniowana za pomocą równania (7)³⁷:

$$P_{f_i} = P[G_i(x, t) < 0] \quad (7)$$

gdzie:

G_i – funkcja błędu opisująca stan systemu.

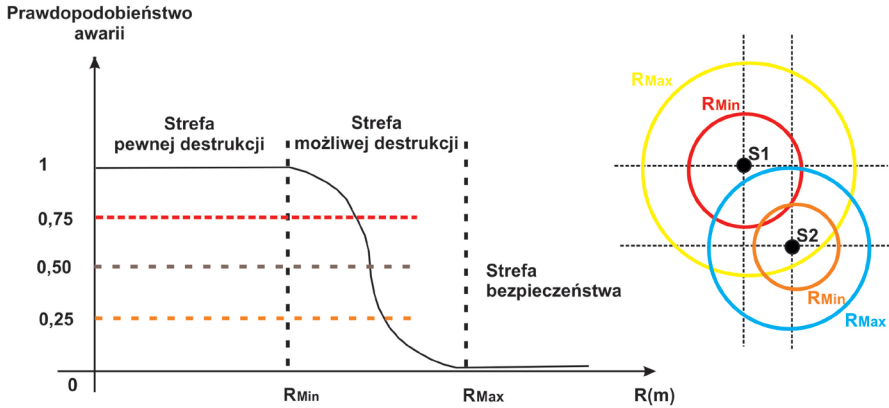
Całkowita możliwość wystąpienia awarii P_{F_j} dla każdego z wektorów eskalacji, które mają wpływ na podsystem odbiorczy (S_j) może zostać obliczona za pomocą równania (8):

$$P_{F_j} = P[U_{i=1}^k \{G_i(\vec{X}) < 0\}] \quad (8)$$

Inaczej wygląda prawdopodobieństwo efektu domino i określanie stref nim dotkniętych. Podczas gdy prawdopodobieństwo awarii P_{F_j} jest znane dla każdego podsystemu, prawdopodobieństwo efektu domino i promień uszkodzeń (strefa dotknięta) mogą zostać oszacowane dla całości systemu. Efekt domino implikuje interakcję pomiędzy minimum dwoma strefami. Promień uszkodzeń oraz strefy dotknięte zostały zobrazowane na ryc. 6. Poziom uszkodzeń zwiększa się w obszarach objętych awarią, ale także w każdej strefie dotkniętej efektem domino³⁸.

³⁷ jw.

³⁸ jw.



Ryc. 6. Strefy pod wpływem efektu domino

Źródło: F. Kadri, E. Chatelet, P. Lallement, *The Assessment of Risk Caused by Fire and Explosion in Chemical Process Industry: A Domino Effect-Based Study*, „Journal of Risk Analysis and Crisis Response” 2013, 3(2), s. 66–76.

Zgodnie z informacjami ujętymi na ryc. 6 możemy zdefiniować trzy główne strefy, będące pod wpływem efektu domino: 1) strefę pewnej destrukcji – prawdopodobieństwo ucierpienia wszystkich sprzętów znajdujących się na tym obszarze wynosi 1; 2) strefę możliwej destrukcji – w tej strefie prawdopodobieństwo awarii zawiera się w przedziale pomiędzy $0 \leq P_F \leq 1$ oraz 3) strefę bezpieczeństwa – prawdopodobieństwo ucierpienia wyposażenia wynosi 0³⁹.

Prawdopodobieństwo każdego ze scenariuszy domino (sekwencji wypadków typu domino) może zostać obliczone w następujący sposób:

$$P_{Do_i} = \prod_{j=1}^n P_{F_j} \quad (9)$$

gdzie:

n – liczba podsystemów objętych awarią, w tym sekwencją domino,

P_{Do_i} – wspólne prawdopodobieństwo ulegnięcia awarii każdego z elementów z sekwencji⁴⁰.

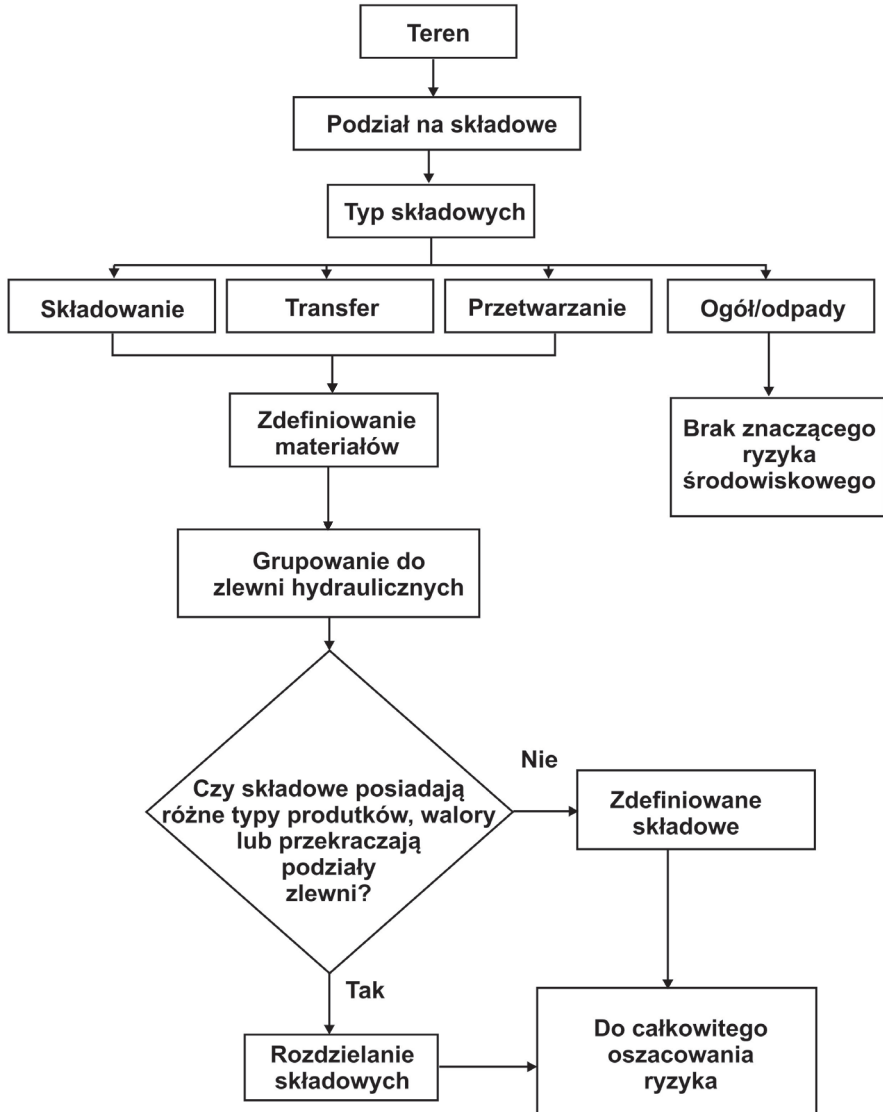
4. Umiejscowienie danych dotyczących prawdopodobieństwa efektów domino na mapach

Wszystkie informacje niezbędne do oszacowań ryzyka potencjalnej awarii powinny być widoczne wraz z danymi o umiejscowieniu i wzajemnych odległościach ogółu obiektów z nimi związanych. To samo dotyczy potencjalnych przyczyn efektu domino. Dane dotyczące ważnych obiektów, cech terenu oraz oddziaływań

³⁹ jw.

⁴⁰ jw.

powinny więc zostać sprzężone z mapami w systemie GIS (*Geographic Information System*). Koncepcję przykładowego podziału analizy pod względem zagrożenia terenu przedstawia ryc. 7⁴¹.



Ryc. 7. Schemat metody podziału obszaru analizy na podobszary

Źródło: *Supplement to Guideline – Environmental Risk Tolerability for COMAH Establishments*, Complex Site Example; Chemical and Downstream Oil Industries Forum, 1999.

⁴¹ *Supplement to Guideline – Environmental Risk Tolerability for COMAH Establishments*, Complex Site Example; Chemical and Downstream Oil Industries Forum, 1999.

Na mapach, podobnie jak dla oszacowań prawdopodobieństwa awarii, powinny zostać zawarte niżej wskazane informacje:

Informacje o substancjach niebezpiecznych

Konieczna jest dostępność informacji o substancjach niebezpiecznych dla środowiska. Lista substancji, jakie należy rozpatrywać, powinna zostać wygenerowana w oparciu o ich niebezpieczne właściwości fizykochemiczne i ilości substancji, które są magazynowane lub składowane w zakładzie. Lista powinna obejmować substancje obecne w warunkach typowych i nietypowych. Wszystkie substancje powinny być ocenione pod kątem potencjalnego ryzyka środowiskowego, nie tylko te, dla których oficjalnie udokumentowano ryzyko. Pozwala to uzasadnić ewentualne wykluczenie substancji. Należy też przedstawić informację o zachowaniu substancji w środowisku, jak również dane o bezpośrednich i opóźnionych skutkach działania substancji. Inne wymagane informacje to: trwałość w środowisku, współczynnik biokoncentracji, zdolność potencjalnej bioakumulacji, rozpuszczalność, gęstość itd.⁴².

Opis zakładu

Należy opisać wszystkie aspekty dotyczące zakładu odnoszące się do zakresu oceny ryzyka środowiskowego. Dane te obejmują: systemy zarządzania, systemy kontroli, procedury, działania i wyposażenie, które odnoszą się do oceny ryzyka środowiskowego, a mogą nie być uwzględnione w aspektach bezpieczeństwa rozpatrywanych w raporcie o bezpieczeństwie. Rodzaje informacji, które w szczególności odnoszą się do oceny ryzyka środowiskowego to:

- lokalizacja, wykaz i warunki użytkowania/przechowywania substancja niebezpiecznych dla środowiska,
- układ i podział systemu odwadniającego, barier itd.,
- mapy i plany przedstawiające te cechy zakładu, które mogą być istotne w przypadku rozlanych substancji,
- działania odnoszące się do ryzyka środowiskowego,
- wewnętrzne urządzenia oczyszczające⁴³.

Opis środowiska

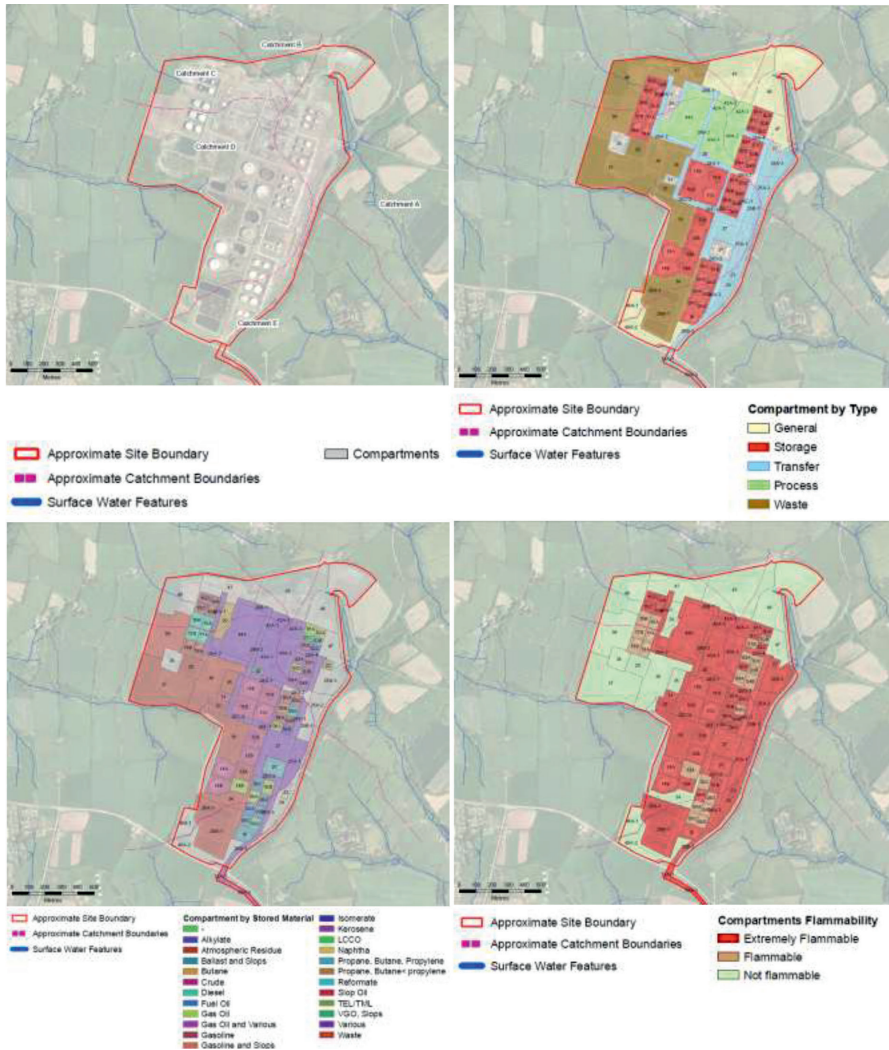
Należy opisać wszystkie aspekty środowiska odnoszące się do zakresu oceny ryzyka środowiskowego. Dotyczy to wszystkich mediów środowiskowych i obejmuje:

- wody powierzchniowe,
- wody podziemne,
- glebę i osady.

⁴² *Supplement to Guideline – Environmental Risk Tolerability for COMAH Establishments*, Complex Site Example; Chemical and Downstream Oil Industries Forum, 1999.

⁴³ jw.

Przykładowa analiza ryzyka została przeprowadzona w dokumencie „Environmental Risk Tolerability for COMAH Establishments”, gdzie rozważano potencjalne ryzyko awarii dla jednej z rafinerii we wschodniej Walii oraz towarzyszących jej terenów. Ryc. 8⁴⁴ ukazuje wyniki podziału wymienionego wyżej obszaru na podobszary za pomocą metody ukazanej na ryc. 5.



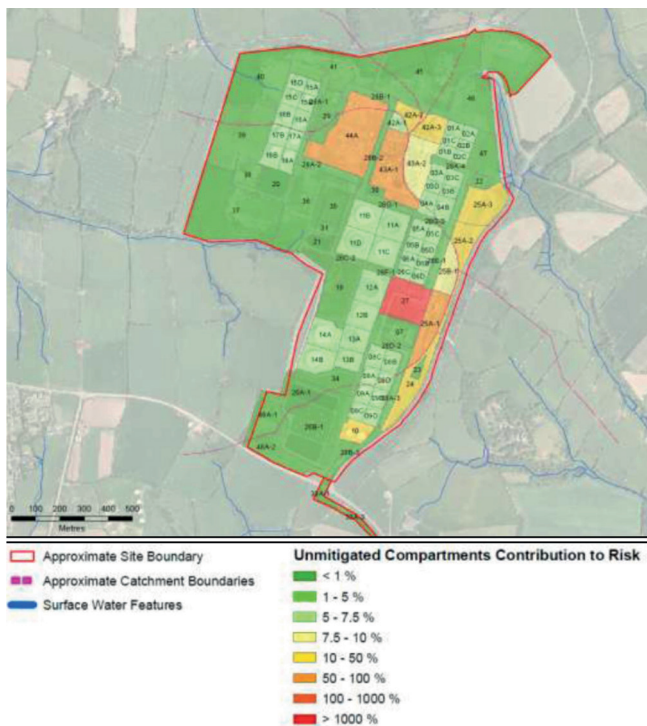
Ryc. 8. Wyniki podziału obszaru – analizowanego w publikacji Guideline COMAH – na podobszary według metody z ryc. 5

Źródło: *Supplement to Guideline – Environmental Risk Tolerability for COMAH Establishments*, Complex Site Example; Chemical and Downstream Oil Industries Forum, 1999.

⁴⁴ *Supplement to Guideline – Environmental Risk Tolerability for COMAH Establishments*, Complex Site Example; Chemical and Downstream Oil Industries Forum, 1999.

Po potwierdzeniu obecności na analizowanym terenie instalacji służących do przechowywania i przetwarzania materiałów, mających potencjał do wywierania wpływu na środowisko, można przystąpić do szacowania tego wpływu (Guideline COMAH)⁴⁵.

Wyniki oszacowań ryzyka (bez podjęcia żadnych środków zaradczych), przeprowadzone przez M. Nicholas, J. Coates, P. Davidson, H. Bray⁴⁶ oraz ujęte w publikacji (Guideline COMAH)⁴⁷, przedstawia ryc. 9. Analogicznie powinny zostać przedstawione strefy zagrożone efektem domino.



Ryc. 9. Udział ryzyka występującego bez podjęcia żadnych środków zaradczych jako udział w częstości ryzyka nietolerowanego.

Źródło: *Supplement to Guideline – Environmental Risk Tolerability for COMAH Establishments*, Complex Site Example; Chemical and Downstream Oil Industries Forum, 1999.

Wyżej wskazane wyniki w pełni obrazują, że ryzyko dla pojedynczego przedziału stanowi niedopuszczalne zagrożenie.

⁴⁵ *Supplement to Guideline – Environmental Risk Tolerability for COMAH Establishments*, Complex Site Example; Chemical and Downstream Oil Industries Forum, 1999.

⁴⁶ M. Nicholas, I. Brocklebank, J. Coates, P. Davidson, H. Bray, *Environmental Risk Tolerability for Major Accident Hazard Sites: A Method for Quantifying and Assessing Environmental Risk*, IChemE Hazards 24 Conference, Edinburgh, Scotland, May 2014.

⁴⁷ *Supplement to Guideline – Environmental Risk Tolerability for COMAH Establishments*, Complex Site Example; Chemical and Downstream Oil Industries Forum, 1999.

5. Podsumowanie

Substancje niebezpieczne, które są wytwarzane i przechowywane w zakładach przemysłowych, mogą w warunkach awarii powodować wybuchy, pożary i fragmentacje zbiorników oraz rurociągów. To z kolei może doprowadzić do kolejnych zdarzeń eskalujących, co będzie oddziaływać lub wpływać na zbiorniki, rurociągi, linie energetyczne i inne obiekty umiejscowione w obrębie zakładu przemysłowego. Katastrofalne skutki takich ciągów zdarzeń mogą następnie wpłynąć negatywnie na cały zakład i jego sąsiedztwo. Przewidywanie możliwych konsekwencji wywołanych wystąpieniem efektu domino jest więc bardzo ważnym etapem analiz, które powinny znaleźć swoje odzwierciedlenie w raportach o bezpieczeństwie. W niniejszym rozdziale zaprezentowano metodykę identyfikacji wystąpienia efektów domino w oparciu o prace wykonane w ramach implementacji brytyjskiej wersji dyrektywy Seveso. Metodyka ta może znaleźć zastosowanie w analizach ryzyka, które należy wykonać na potrzeby raportu o bezpieczeństwie. Zawiera także formę prezentacji wyników tego rodzaju analizy na mapach cyfrowych, co ułatwia dalsze badania i wyciągnięcie z nich wniosków.

Literatura

- Atkins W.S., *Safety & Reliability for Health and Safety Executive. Development of Methods to Assess the Significance of Domino Effects from Major Hazard Sites*. Contract Research Report, 1998, 189/1998.
- CCPS (Centre for Chemical Process Safety), *Guidelines for Chemical Process Quantitative Analysis*, Second Edition, American Institute of Chemical Engineers, New York 2000.
- Cozzani V., Salzano E., *The Quantitative Assessment of Domino Effect Caused by Overpressure Part II, Case Studies*, „Journal of Hazardous Materials” 2004, A107.
- Eisenberg N.A., Lynch C.J., Breeding R.J., *Vulnerability Model: A Simulation System for Assessing Damage Resulting from Marine Spills*, Report CG-D-136-75, Enviro Control Inc., Rockville, MD, 1975.
- Kadri F., Chatelet E., Lallement P., *The Assessment of Risk Caused by Fire and Explosion in Chemical Process Industry: A Domino Effect-Based Study*, „Journal of Risk Analysis and Crisis Response” 2013, 3(2).
- Lath P., Gautam G., Raghavan K.V., *Strategies for Quantification of Thermally Initiated Cascade Effects*, „Journal of Loss Prevention Process Industries” 1992, 5(1).
- Nicholas M., Brocklebank I., Coates J., Davidson P., Bray H., *Environmental Risk Tolerability for Major Accident Hazard Sites: A Method for Quantifying and Assessing Environmental Risk*, IChemE Hazards 24 Conference, Edinburgh, Scotland, May 2014.

- Pettitt G.N., *Evaluating the Probability of Major Hazardous Incidents as a Result of Escalation Events*, „Journal of Loss Prevention Process Industries” 1993, 6(1).
- Scilly N.F., Crowther J.H., *Methodologies for Predicting Domino Effects from Pressure Vessel Fragmentation*. In International Conference on Hazard Identification and Risk Analysis, Human Factors and Human Reliability in Process Safety, Florida, CCPS, AIChE, 1992.
- Singh V.P., Singh P., Haritashya K., *Studies on Chain of Accidents (Domino Effect)*, „Process Safety” 2000, 19(1).
- Supplement to Guideline – *Environmental Risk Tolerability for COMAH Establishments*, Complex Site Example; Chemical and Downstream Oil Industries Forum, 1999.

ROZDZIAŁ VI.

**OCENA ZAGROŻEŃ
ŚRODOWISKOWYCH
WYWOŁYWANYCH PRZEZ POWAŻNE
AWARIE PRZEMYSŁOWE**

Mieczysław Borysiewicz, Ewa Kowalik-Pilarska,
Grzegorz Siess, Henryk Wojciechowicz

Narodowe Centrum Badań Jądrowych

1. Wprowadzenie

Poważne awarie przemysłowe i transportowe bardzo często mają katastroficzne skutki dla środowiska. Indywidualny charakter każdej awarii oraz złożoność otoczenia sprawiają, że bardzo ważna jest znajomość odpowiedzi środowiska na czynniki, które mogą spowodować jego zniszczenie.

Uszkodzenia pokrywy roślinnej powstające w wyniku awarii przemysłowej mogą być ostateczne, polegać na wymarciu wszystkich roślin znajdujących się w zasięgu czynnika powstałego w wyniku awarii lub na utracie ważnych z punktu widzenia ekosystemu elementów, takich jak na przykład drzewa, krzewy itp. Utrata konkretnych gatunków fauny i flory wpływa z kolei na skład gatunkowy, strukturę i funkcjonowanie całego ekosystemu.

Zniszczenia środowiska mogą ujawnić się natychmiast lub po pewnym czasie po wystąpieniu awarii. Są one wtedy dużo trudniejsze do uchwycenia i oszacowania. Tego typu skutki, polegające na przykład na zmniejszeniu populacji konkretnych gatunków, mają bardzo duży wpływ na ekosystem. Jednocześnie, środowisko naturalne posiada określony zakres elastyczności i odporności na zjawiska ekstremalne, dzięki czemu ekosystemy potrafią przetrwać różnego rodzaju zaburzenia.

2. Ogólne zasady podatności i reakcji środowiska

Podatność ekosystemu na zaburzenia uzależniona jest od wielu czynników. Zależy między innymi od: rozmiaru ekosystemu, jego fragmentacji i wzorca krajo-brazowego.

Wrażliwość na działanie czynników niebezpiecznych będzie się różnić w zależności od¹:

- drogi i sposobu transportu czynnika szkodliwego w obrębie ekosystemu,
- złożoności danego ekosystemu,
- indywidualnej reakcji gatunków na działanie zanieczyszczeń.

¹ M. Borysiewicz, W. Kacprzyk, A. Romańczak, K. Rymwid-Mickiewicz, *Środki zapobiegawcze i ograniczające w planowaniu przestrzennym* – Raport Projektu River Shield” IOŚ, 2008.

W przypadku ekosystemów wodnych krytyczne znaczenie mają²:

- rozmiar ekosystemu wodnego,
- stopień przemieszczania i mieszania się wód.

Podatność ekosystemów estuariów będzie dodatkowo zależna od zakwaszenia, zasolenia, temperatury i sezonowości³.

Wrażliwość środowiska przyrodniczego na działanie substancji chemicznych będzie się różnić w zależności od⁴:

- miejsca i charakteru emisji,
- rodzaju chemikaliów (wpływ na drogę i sposób ich transportu w obrębie ekosystemu),
- rodzaju ekosystemu,
- indywidualnej reakcji gatunków na działanie danej substancji chemicznej.

Skutki wystąpienia awarii przemysłowej można podzielić na dwa typy⁵:

- bezpośrednie,
- opóźnione, długotrwałe.

Skutki bezpośrednie to⁶: zwiększona śmiertelność ludzi i zwierząt, degradacja roślinności, bezpośrednia depozycja substancji szkodliwych, bezpośrednie mierzalne zanieczyszczenie zasobów ważnych dla człowieka lub bezpośrednie zagrożenie zdrowia ludzkiego.

Skutki długotrwałe obejmują⁷: stopniową ogólną degradację środowiska lub zmniejszenie jego wartości, trwałą obecność chemikaliów w środowisku, a także mutacje genetyczne w populacji, będące następstwem awarii.

Ocena znaczenia lub czasu oddziaływania skutków zdarzenia awaryjnego zależy od następujących czynników⁸:

- rodzaj i charakter zasobów, na które wpływ miała awaria,
- całkowity obszar dotknięty skutkami awarii oraz obszary zajmowane przez poszczególne zasoby środowiska,
- znaczenie zasobu w skali lokalnej, krajowej i międzynarodowej,
- rodzaj oddziałujących substancji, ich toksyczność i trwałość w środowisku,
- rodzaj i charakter awarii.

2.1 Ocena zasobów

Opracowywanie kryteriów definiujących zagrożenia dla środowiska łączy się z potrzebą oszacowania względnej wartości zasobów. Istnieją dwa główne rodzaje szacowania zasobów:

² jw.

³ jw.

⁴ jw.

⁵ jw.

⁶ jw.

⁷ jw.

⁸ jw.

- ekologiczna ocena jakości ekosystemu niezależna od interesu społecznego,
- ocena społeczno-ekonomiczna szacująca funkcjonowanie środowiska przyrodniczego z punktu widzenia potrzeb człowieka.

Zalecane jest połączenie obu wskazanych typów oceny, zapewniające właściwą ochronę gatunków i siedlisk, ale też uwzględniające obszary o dużym znaczeniu dla gospodarki człowieka.

2.2 Typy zakładów

Jako potencjalne miejsca awarii niebezpiecznych dla środowiska można wyróżnić następujące rodzaje zakładów lub działań:

- stacjonarne instalacje chemiczne;
- magazyny środków chemicznych i agrochemicznych;
- instalacje magazynujące w elektrowniach;
- oczyszczalnie ścieków;
- działalność transportowa (drogowa, kolejowa, morska i śródlądowa), zwłaszcza w zakresie oleju napędowego – transport jest głównym źródłem zanieczyszczeń awaryjnych, ponieważ substancje ropopochodne używane są jako paliwa;
- obszary portów i lotnisk;
- rurociągi przesyłowe;
- zbiorniki odpadów i zbiorniki końcowe w przemyśle wydobywczym.

2.3 Scenariusze awarii przemysłowych

W zależności od wywołanych skutków awarie przemysłowe mogą zostać zaliczone do poważnych awarii przemysłowych. Na podstawie rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 30 grudnia 2002 r.⁹, wydanego zgodnie z art. 31 ust. 4 ustawy z dnia 20 lipca 1991 r. o Inspekcji Ochrony Środowiska¹⁰, poważne awarie przemysłowe są objęte obowiązkiem zgłoszenia do Głównego Inspektora Ochrony Środowiska. Dokument ten został zmieniony rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 18 maja 2016 r.¹¹.

Rozporządzenie określa:

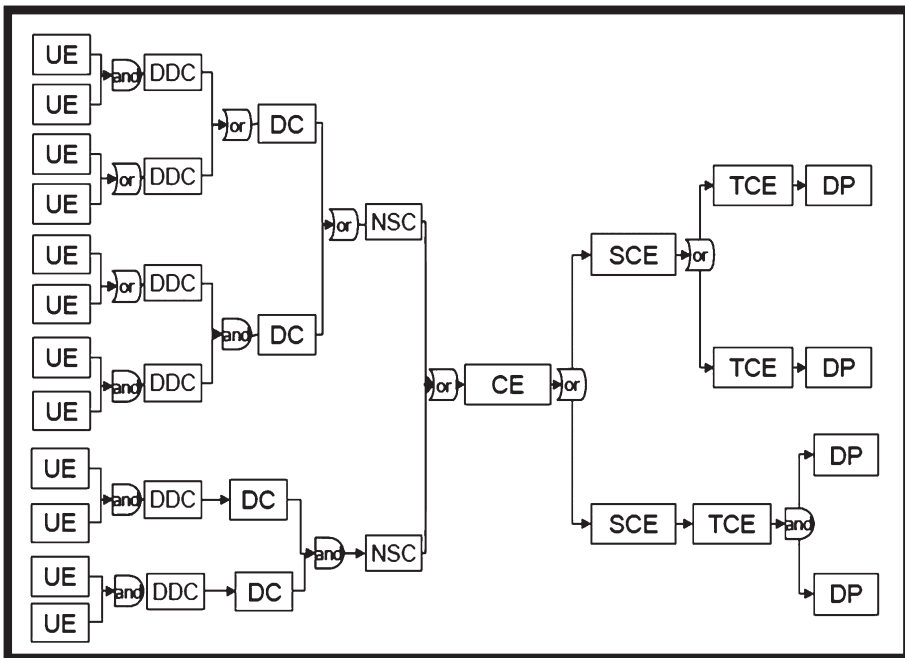
- kryteria charakteryzujące poważne awarie, objęte obowiązkiem zgłoszenia do Głównego Inspektora Ochrony Środowiska przez organy administracji właściwe do zwalczania poważnych awarii,
- terminy zgłoszenia poważnych awarii,
- zakres informacji zawarty w zgłoszeniu o poważnej awarii.

⁹ Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 grudnia 2002 r. w sprawie poważnych awarii objętych obowiązkiem zgłoszenia do Głównego Inspektora Ochrony Środowiska (Dz.U. z 2003 r. Nr 5, poz. 58).

¹⁰ Ustawa z dnia 20 lipca 1991 r. o Inspekcji Ochrony Środowiska (Dz.U. z 1991 Nr 77, poz. 335 z późn. zm.).

¹¹ Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 18 maja 2016 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie poważnych awarii objętych obowiązkiem zgłoszenia do Głównego Inspektora Ochrony Środowiska (Dz.U. z 2016 r., poz. 799).

Awarie przemysłowe są to zdarzenia nagłe o bardzo rozbudowanym przebiegu. Zespół ekspertów z Politechniki Łódzkiej opracował system ekspercki do generacji przebiegu scenariuszy awaryjnych w zakładach dużego ryzyka¹². Korzystając z informacji o ilości, rodzaju substancji niebezpiecznych oraz rodzaju instalacji i właściwościach fizykochemicznych procesów w nich zachodzących, można wygenerować listę scenariuszy awaryjnych dla konkretnych instalacji. Jest to metoda oparta na założeniach metodyki MIMAH (*Methodology for the Identification of Major Accident Hazards*), stosującej standardowe podejście z wykorzystaniem drzewa błędów FTA (*Fault Tree Analysis*) i drzewa zdarzeń ETA (*Event Tree Analysis*). Rezultatem zastosowania tej metodologii jest diagram „muchy”, w którym przyczyny i konsekwencje wypadku zbiegają się w jednym punkcie ze zdarzeniami krytycznymi (CE, *critical event*).



Ryc. 1. Schemat metody MIMAH – podejście „Muchy”

SCE – drugorzędowe zdarzenia krytyczne, TCE – trzeciorzędowe zdarzenia krytyczne, DP – zjawiska niebezpieczne, CE – zdarzenia krytyczne, UE – zdarzenia niepożądane, DDC – szczegółowe przyczyny bezpośrednie, DC – przyczyny pośrednie, NSC – niezbędne oraz wystarczające warunki

Źródło: A. Bernatík, *Prevence závažných havárií II*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava Fakulta bezpečnostního inženýrství, Ostrava 2006.

¹² S. Markowski, H. Pawlak, M. Pietrzykowski, R. Żyłła, *System ekspercki generowania scenariuszy awaryjnych w zakładach dużego ryzyka*, Politechnika Łódzka, Katedra Inżynierii Bezpieczeństwa Pracy, 2012.

Metodyka MIMAH prowadzi do generacji ogólnych scenariuszy wypadków, które są tzw. najgorszymi scenariuszami i należy je dostosować do specyficznych warunków w ocenianej instalacji¹³.

2.4 Ocena prawdopodobieństwa wystąpienia scenariuszy awaryjnych

Dla każdego scenariusza awarii definiowane są szczegółowe informacje źródłowe, włączając w to wszystkie dane niezbędne do określenia natury i częstości występowania uwolnień. Informacje źródłowe obejmują:

- uwalniane substancje, rozmiar/poziom uwolnienia/czas uwalniania,
- warunki uwolnienia (ciśnienie, temperatura, faza),
- lokalizację, kierunki uwolnienia,
- warunki zewnętrzne,
- częstość lub prawdopodobieństwo uwolnienia.

Częstość awarii będzie determinowana przez częstość występowania kombinacji zdarzeń początkujących i określonych warunków lub czynników zewnętrznych. Wypracowano kilka podstawowych podejść do oceny częstości awarii, które można stosować oddzielnie lub w kombinacjach:

- podejście jakościowe,
- ogólne dane historyczne o zaistniałych niepowodzeniach i niesprawnościach,
- specyficzne dane historyczne dotyczące przedsiębiorstwa/zakładu lub instalacji,
- bezpośrednia kwantyfikacja (np. z użyciem drzewa błędów).

3. Scenariusze zdarzeń zagrażających środowisku, wywołanych awariami przemysłowymi

3.1 Uwolnienia substancji szkodliwych dla środowiska

Przypadki nagłego i nieoczekiwane uwolnienia substancji szkodliwych do środowiska najczęściej przebiegają w określony sposób. Rozmiary i skale tych zdarzeń są bardzo zróżnicowane, podobnie jak skutki dla ekosystemu. Zdarzenia o małej skali obejmują uwolnienia z gospodarstw domowych lub małych przedsięwzięć komercyjnych i dotyczą wprowadzenia chemikaliów tylko do środowiska lokalnego. Zdarzenia na dużą skalę, takie jak duże pożary lub rozlania substancji przenikające do rzek lub warstw wodonośnych, mogą oddziaływać na środowisko w dużej skali geograficznej i nieść ze sobą długotrwałe skutki.

To, na ile poważne są skutki uwolnienia chemikaliów, zależy w dużym stopniu od charakterystyki środowiska, do którego trafia. Na przykład, niektóre substancje

¹³ A. Bernatík, *Prevence závažných havárií II*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava Fakulta bezpečnostního inženýrství, Ostrava 2006.

chemiczne mogą spowodować zanik populacji rzadkich organizmów, zaburzyć integralność siedliska lub wpłynąć na funkcje, jakie zasoby środowiska pełnią w gospodarce człowieka. Skutki awarii zależne są również od pory roku – znacznie groźniejsze jest uwolnienie w okresie prowadzenia upraw rolnych lub w sezonie lęgowym ptactwa niż zimą.

Požary

Chemikalia uwolnione do powietrza w przypadku pożaru mogą rozprzestrzeniać się w promieniu wielu kilometrów, a w wyniku procesów utlenienia lub pirolizy może dochodzić do powstawania nowych, często bardziej szkodliwych związków chemicznych.

Materiały powstałe w wyniku pożaru mogą być przenoszone wraz z wodami pogaśniczymi do cieków i zbiorników wodnych. Wody pogaśnicze, spływając po powierzchni i przenikając do gleby, uaktywniają także zmagazynowane tam wcześniej substancje, co może prowadzić do innych wtórnych skażeń. Ponadto niektóre substancje gaśnicze używane w trakcie gaszenia pożarów chemikaliów, inne niż woda, same w sobie mogą być przyczyną szkód dla środowiska.

Oprócz rozprzestrzeniania chemikaliów na duże odległości, pewne materiały uwolnione w trakcie pożaru mogą też podlegać znaczącej lokalnej depozycji. Dotyczy to na przykład materiałów pochodzących z budynków, w tym materiałów dachowych zawierających azbest. Pożar może też spowodować uwolnienie materiałów płynnych, co prowadzi do skutków podobnych jak przy rozlaniu.

Rozlania

Jeżeli rozlanie spowoduje zmianę fizycznych, chemicznych lub biologicznych warunków glebowych, może to mieć poważne skutki, włącznie z utratą zdolności ekosystemu do odbudowy równowagi (utrata homeostazy). Ponadto rozlanie na łądzie może powodować zanieczyszczenie wód gruntowych i skażenie gleb. Odnosi się to zwłaszcza do substancji rozpuszczalnych w wodzie.

Rozlania do cieków wodnych wiążą się z ryzykiem szybkiego transportu zanieczyszczeń na duże odległości wraz z wodami rzecznyymi. Skutki rozlewów substancji rozpuszczalnych w wodzie uzależnione są od stopnia rozpuszczalności rozlanej substancji.

Analiza ścieżki zanieczyszczenia na miejscu zdarzenia

Analiza drogi zanieczyszczenia na miejscu zdarzenia wyznacza czynniki zidentyfikowane przy weryfikacji przebiegu awarii, w celu oceny prawdopodobieństwa przedostania się uwolnionej substancji poza granice zakładu.

Uwolnione w wyniku awarii substancje nie zawsze przedostają się do środowiska. Mogą zostać przechwycone przez zakładowy system kanalizacji i w nim zatrzymane. W niektórych przypadkach konieczna jest analiza ścieżki przedostania się substancji poza miejsce awarii, na przykład do zewnętrznej sieci kanalizacyjnej.

3.2 Skutki awarii

Rozległość zagrożenia

Środowiskowe skutki uwolnienia można opisać za pomocą modelowania transportu i „losów” zanieczyszczenia. Wyniki można przedstawić w następujący sposób:

- 1) schemat kwalifikacji jakościowej awarii,
- 2) dawka uwolnionej substancji docierająca do wrażliwego receptora,
- 3) czas, w jakim zanieczyszczenie dociera do wrażliwego receptora,
- 4) zasięg plamy zanieczyszczenia,
- 5) indeks szkodliwości dla środowiska (*Environmental Harm Index*, EHI).

Indeks jest zdefiniowany następująco:

$$EHI = \frac{PEC_{max}S_{max}}{minLC_{50}S_{ref}} \quad (1)$$

gdzie:

PEC_{max} – maksymalne stężenie w środowisku,

S_{max} – odległość do niebezpiecznego stężenia,

$minLC_{50}$ – stężenie powodujące 50-procentowe skutki śmiertelne w ekosystemie,

S_{ref} – odległość referencyjna dla rzek (*Green Book* TNO).

Innym indeksem jest *Environmental Risk Index* (ERI), będący średnią ważoną opartą na prawdopodobieństwie wskaźników ESI (*Environmental Severity Index*):

$$ESI = \sqrt{(toxicity_factor) \times (damage_factor)} \quad (2)$$

Substancje niebezpieczne dla środowiska

Dyrektywa Seveso II i dyrektywa Seveso III wprowadziły listę substancji niebezpiecznych, które – jeżeli są magazynowane lub przerabiane w zakładach – powodują zakwalifikowanie zakładu do Zakładów Zwiększonego Ryzyka lub do Zakładów Dużego Ryzyka. Załącznik I dyrektywy Seveso III zawiera listę tych substancji wraz z ilościami progowymi, które powodują zaliczenie zakładu do odpowiedniego typu.

W opisanych w literaturze przypadkach awarii występowały następujące kategorie substancji niebezpiecznych:

1. Substancje bardzo toksyczne dla organizmów wodnych, trwałe w środowisku wodnym; zarówno nieorganiczne, jak i organiczne.
2. Substancje bardzo toksyczne dla organizmów wodnych, nietrwałe w środowisku wodnym.
3. Substancje toksyczne dla organizmów wodnych, trwałe w środowisku wodnym.

4. Pesticydy, herbicydy i insektycydy – klasyfikacja większości z nich ze względu na skutki środowiskowe stanowi odrębną kategorię, ponieważ często biorą udział w awariach, a konsekwencje ich oddziaływania są bardzo poważne (włączając w to efekty synergistyczne wynikające z uwolnienia więcej niż jednej substancji).

Szczególna grupa to substancje ropopochodne (na przykład benzyna, nafta, olej napędowy). Stanowią odrębną kategorię ze względu na różne charakterystyki fizykochemiczne oraz zachowanie w środowisku wodnym i „losy” środowiskowe. Substancje ropopochodne bardzo często biorą udział w awariach mających katastrofalne skutki środowiskowe.

Substancje, takie jak piana gaśnicza i produkty rozkładu termicznego (pirolizy) związane są z zanieczyszczeniem środowiska wodnego wodami gaśniczymi, do którego dochodzi w wyniku dużych pożarów, zwłaszcza magazynów chemicznych (w tym magazynów pestycydów i nawozów). Trzeba podkreślić trudności, jakie sprawia przewidywanie produktów rozkładu termicznego tego typu substancji. Związane jest to ze skomplikowanymi reakcjami chemicznymi, które zachodzą w trakcie spalania i pirolizy substancji organicznych. Produkty tych reakcji mogą być różne w przypadku zmiennych właściwości procesu spalania.

Substancje obecne w wodach odpadowych (odpady z działalności górniczej i oczyszczalni) stanowią kolejną interesującą kategorię zanieczyszczeń, chociaż trudno jest przewidzieć dokładny skład tych wód. Awarie, do jakich doszło w Rumunii (Baia Mare, Rumunia, 31 stycznia 2000 r.), dowodzą dużego znaczenia tej kategorii substancji.

Drugi rozprzestrzeniania się zanieczyszczenia

W trakcie analizy awarii historycznych zidentyfikowano wiele dróg zanieczyszczenia, z czego najbardziej specyficzne to¹⁴:

- zrzucenie wód gaśniczych do środowiska wodnego,
- zrzuty poprzez system kanalizacji,
- zrzuty poprzez system kanalizacji deszczowej,
- zrzuty razem z wodami odpadowymi w oczyszczalniach ścieków,
- bezpośrednie uwolnienie (np. z pękniętego rurociągu lub uszkodzonego zaworu),
- przelanie ze zbiorników magazynowych,
- uwolnienie w trakcie operacji napełniania lub wyładunku (np. statków lub barek),
- zrzuty poprzez system wód chłodniczych,
- uwolnienie do powietrza a następnie zanieczyszczenie środowiska wodnego w wyniku depozycji (cząstek lub deszczu),
- bezpośrednie zrzuty do ziemi (substancja niebezpieczna może przesączyć się do warstwy wodonośnej lub przedostać do środowiska wodnego).

¹⁴ K. Borysiewicz, W. Kacprzyk, A. Romańczak, K. Rymwid-Mickiewicz, dz. cyt.

Uszkodzenia ekosystemów

Jednym z podstawowych parametrów definiujących skutki awarii są uszkodzenia ekosystemu. Ekosystem jest układem ekologicznym, który składa się z biocenozy oraz biotopu. Biocenozę stanowią organizmy żywe, natomiast biotopem jest środowisko abiotyczne (czynniki fizykochemiczne). W ekosystemie biocenoza jest ściśle powiązana z biotopem i tworzy z nim funkcjonalną całość. Uszkodzenie, nawet jednego elementu w ekosystemie powoduje zaburzenie w jego funkcjonowaniu. Z reguły, w przypadku zagrożeń środowiskowych rozpatrywane są ekosystemy wodne, takie jak wody powierzchniowe – rzeki, jeziora, estuaria i wody morskie, które obejmują nie tylko siedliska wodne, ale także gatunki ptaków i owadów, poszukujące w tych siedliskach pożywienia.

Ekosystemy wodne obejmują¹⁵:

- organizmy bentosowe,
- roślinność wodną,
- rozwielitki i glony,
- ryby (na przykład pstrągi, lipienie, węgorze, łososie, ryby morskie),
- bezkręgowce,
- owady,
- ptaki,
- gatunki brzegowe,
- gatunki poszukujące pożywienia w siedliskach wodnych,
- siedliska lądowe nawadniane przez zanieczyszczoną rzekę lub jezioro,
- populacje zamieszkujące środowisko wodne sezonowo (ptaki migrujące, inne zwierzęta w trakcie migracji),
- populacje ryb hodowlanych i innych hodowlanych organizmów wodnych.

Zasięg skutków jest bezpośrednio związany z rodzajem uwolnionej substancji niebezpiecznej i jej ilością. Im substancja jest bardziej toksyczna dla środowiska wodnego, tym poważniejsze są skutki jej uwolnienia. Ważnym parametrem jest też trwałość substancji – im trwalsza substancja, tym dłużej ekosystem wraca do stanu wyjściowego. Jednocześnie długi okres restauracji środowiska może być skutkiem awarii z udziałem substancji bardzo toksycznej, ale nietrwałej, ze względu na rozległe skutki i fakt, że po awarii nie ma siedlisk nieskażonych.

W ujęciu ilościowym ważną konkluzją wynikającą z analiz awarii jest stwierdzenie, że bardzo małe ilości substancji mogą spowodować poważne zniszczenia środowiska. Na przykład: podczas awarii w Sandoz (Szwajcaria 1986 r.) ilość pestycydów uwolniona do Renu nie przekroczyła 20 t, podczas gdy w innej awarii zaledwie 40 kg lindanu spowodowało wyginiecie 15 t ryb. Ważne jest także, czy substancja jest już rozcieńczona, na przykład przez wody pogaśnicze lub odpadowe, czy też nie. Małe uwolnienia, niepowodujące dewastujących skutków, nie powinny być lekceważone – one także obniżają jakość środowiska wodnego i stan ekosystemów.

¹⁵ jw.

4. Kryteria akceptacji ryzyka środowiskowego

Kryteria akceptacji ryzyka nie są tak dobrze opracowane dla ryzyka środowiskowego, jak dla ryzyka związanego z bezpieczeństwem¹⁶. Niemniej jednak pewne kryteria istnieją.

Są one zawarte w¹⁷:

- „Green Leaves Book” opracowanej przez DETR¹⁸;
- projekcie „Zarządzanie szkodami dla środowiska”, opracowanym przez DETR,
- publikacji HSE¹⁹ na temat tolerowalności poważnych awarii,
- specyficznych kryteriach opracowywanych przez przedsiębiorstwa,
- równoważeniu kosztów, korzyści i ryzyka podczas wyboru opcji,
- metodyce kryteriów akceptacji ryzyka środowiskowego zaproponowanej przez standardy NORRSK²⁰.

Istotnymi kwestiami branymi pod uwagę w ww. zakresie są:

- toksyczność substancji chemicznych dla zwierząt i ludzi,
- fitotoksyczność uwalnianych związków chemicznych dla roślin,
- fizyczne oddziaływanie na zwierzęta,
- fizyczne oddziaływanie na rośliny,
- odkładanie się substancji chemicznych w glebie.

Z kolei skutki środowiskowe mogą być przedstawiane w kategoriach stałych lub długotrwałych, takich jak:

- degradacja obszarów lądowych,
- degradacja siedlisk słodkowodnych,
- degradacja siedlisk morskich,
- degradacja zbiorników wód podziemnych.

Parametrem degradacji może być wielkość obszaru objętego skutkami awarii. Innym parametrem, zaproponowanym przez Standardy NORRSK, jest czas powrotu środowiska do stanu sprzed awarii²¹. Ogólna zasada zakłada, że regeneracja środowiska po awarii trwa bardzo krótko w porównaniu do przewidywanego okresu pomiędzy takimi awariami. NORRSK zaproponował, żeby miarą ryzyka środowiskowego było prawdopodobieństwo przekroczenia czasu T potrzebnego ekosystemowi do odtworzenia stanu sprzed awarii.

Wartości takiego prawdopodobieństwa mogą wynosić w zależności od kategorii szkody 0,5%, 1%, 2%, 5% lub 10%.

¹⁶ M. Borysiewicz, A. Furtek, S. Potemski, *Poradnik metod ocen ryzyka związanego z niebezpiecznymi instalacjami procesowymi*, Instytut Energii Atomowej, Świerk 2000.

¹⁷ M. Borysiewicz, W. Kacprzyk, A. Romańczak, K. Rymwid-Mickiewicz, dz. cyt.

¹⁸ *Guidance on the Interpretation of Major Accident to the Environment for the Purposes of the COMAH Regulations*, Department of Environment, Transport and the Regions, Londyn 1999.

¹⁹ *Reducing Risks, Protecting People – HSE’s Decision-Making Process*, Health and Safety Executive, Norwich 2001.

²⁰ Norsk Standard, *Risk Criteria* (1995).

²¹ jw.

Kategorie szkód dla środowiska są zdefiniowane w następujący sposób:

- niskie – szkody dla środowiska z powrotem do normalnego stanu od 1 miesiąca do roku,
- umiarkowane – szkody dla środowiska z powrotem do normalnego stanu od roku do 3 lat,
- znaczące – szkody dla środowiska z powrotem do normalnego stanu od 3 do 10 lat,
- poważne – szkody dla środowiska z powrotem do normalnego stanu powyżej 10 lat²².

5. Wymagane przez dyrektywy Seveso aspekty oceny ryzyka środowiskowego

5.1 Definicja poważnej awarii

W artykule 3 dyrektywy Seveso II, „poważna awaria” oznacza „niepożądane zdarzenie, takie jak poważna emisja, pożar albo wybuch, powstałe w wyniku niekontrolowanego rozwoju przebiegu wydarzeń w trakcie eksploatacji dowolnego zakładu objętego przepisami tej dyrektywy i prowadzące do poważnego niebezpieczeństwa dla zdrowia człowieka i/lub środowiska, natychmiastowe lub opóźnione, wewnątrz lub na zewnątrz zakładu i zachodzące z udziałem jednej lub większej liczby niebezpiecznych substancji”²³.

Aby awaria została zakwalifikowana jako „poważna awaria”, muszą być spełnione trzy kryteria:

- awaria musi być zapoczątkowana przez „niekontrolowaną sytuację/niekontrolowane zdarzenie”,
- w awarii musi uczestniczyć „jedna lub więcej niebezpiecznych substancji”, spośród wymienionych w załączniku I dyrektywy,
- awaria musi prowadzić do „poważnego niebezpieczeństwa” w odniesieniu do zdrowia człowieka, środowiska lub wartości materialnych.

5.2 Cele raportu o bezpieczeństwie

Zgodnie z dyrektywą Seveso II i Seveso III celem raportu o bezpieczeństwie jest wykazanie, że:

- polityka zapobiegania poważnym awariom (PZPA) oraz system zarządzania bezpieczeństwem (SZB) zostały wdrożone;

²² jw.

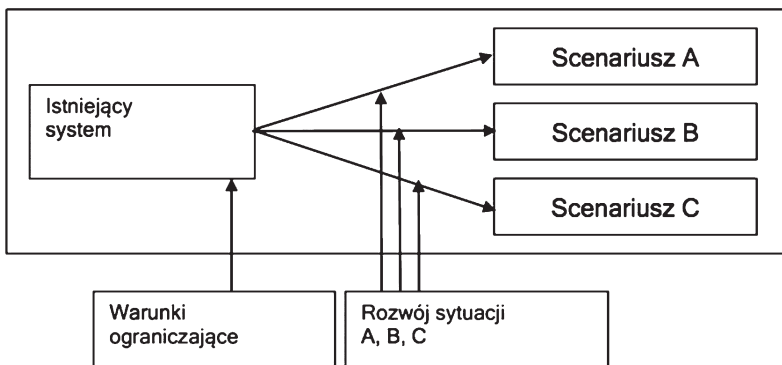
²³ Wyryczne dotyczące sporządzania raportu o bezpieczeństwie według wymogów dyrektywy 96/82/WE, zmienionej przez dyrektywę 2003/1105/WE (Seveso II), L. Fabbri, M. Struckl, M. Wood (red.), CIOP-PIB, Warszawa 2010.

- zagrożenia poważną awarią zostały zidentyfikowane i zostały podjęte niezbędne środki w celu zapobiegania tym awariom oraz w celu ograniczenia ich skutków dla ludzi i dla środowiska;
- właściwe rozwiązania dotyczące bezpieczeństwa i niezawodności na etapie budowy zakładu, jego eksploatacji, konserwacji oraz innych działań zostały uwzględnione w projekcie;
- wewnętrzne plany operacyjno-ratownicze zostały opracowane;
- niezbędne informacje umożliwiające opracowanie zewnętrznego planu operacyjno-ratowniczego zostały przygotowane;
- została dostarczona informacja dotycząca podejmowania decyzji w zakresie zagospodarowania terenów.

5.3 Definicja „scenariusza awarii” według dyrektyw Seveso

Jednym z głównych elementów raportu o bezpieczeństwie jest określenie referencyjnych (najbardziej wiarygodnych) scenariuszy awarii. W praktyce, wszystkie metodologie scenariuszy są narzędziem modelowania. Wykorzystuje się je w planowaniu oraz w procesach podejmowania decyzji. Tego typu metodologie są szeroko stosowane w celach statystycznych, gospodarczych, środowiskowych i technologicznych.

Proces modelowania ilustruje ryc. 2.



Ryc. 2. Proces modelowania scenariuszy awaryjnych

Źródło: Wytyczne dotyczące sporządzania raportu o bezpieczeństwie według wymogów dyrektywy 96/82/WE, zmienionej przez dyrektywę 2003/105/WE (Seveso II), L. Fabbri, M. Struckl, M. Wood (red.), CIOP-PIB, Warszawa 2010.

Dla poszczególnych celów raportów o bezpieczeństwie w kontekście wymagań dyrektywy Seveso II scenariusz jest zawsze zdarzeniem niepożądanym albo sekwencją takich zdarzeń, charakteryzującym się utratą obudowy/rozszerzeniem instalacji albo utratą integralności fizycznej i natychmiastowymi lub opóźnionymi skutkami²⁴.

²⁴ jw.

5.4 Przedstawienie otoczenia zakładu

Raport o bezpieczeństwie powinien zawierać opis otoczenia zakładu, mianowicie:

- opis zakładu i jego otoczenia, włączając w to: lokalizację geograficzną, warunki meteorologiczne, geologiczne, hydrologiczne i jeśli to niezbędne, jego historię;
- identyfikację instalacji oraz innych działań w zakładzie, które mogą stworzyć zagrożenie poważną awarią;
- opis miejsc, gdzie może wystąpić poważna awaria.

Opis lokalizacji zakładu powinien zawierać dane dotyczące topografii oraz dostępności do zakładu w stopniu szczegółowości proporcjonalnym do wielkości zagrożeń i wrażliwości (podatności) otoczenia na uszkodzenia. Szczegółowość opisu środowiska naturalnego i otoczenia zakładu powinna być adekwatna do wielkości zagrożenia. Opis powinien wykazywać, że środowisko naturalne oraz działalności występujące w otoczeniu zostały w stopniu wystarczającym przeanalizowane przez operatora w celu identyfikacji zarówno zagrożeń, jakie mogą one stworzyć w odniesieniu do bezpieczeństwa eksploatacji, jak i wrażliwości otoczenia na oddziaływanie poważnych awarii.

Z uwagi, że w środowisku naturalnym otaczającym zakład mogą występować potencjalne źródła zagrożeń, mogące wpływać na rozwój awarii i jej skutki, niezbędne jest podanie danych opisujących tego rodzaju czynniki środowiskowe.

5.5 Opis instalacji

Opis instalacji powinien zawierać:

- Spis głównych działalności i produktów odnoszących się do poszczególnych części zakładu, które są ważne z punktu widzenia bezpieczeństwa oraz źródeł ryzyka poważnej awarii i warunki, przy których taka poważna awaria może nastąpić, łącznie z opisem proponowanych środków zapobiegawczych. W raporcie o bezpieczeństwie powinny zostać zawarte wystarczające informacje, pozwalające kompetentnej władzy na ocenę, czy metody przeciwdziałania – przewidziane w zakładzie w odniesieniu do niebezpiecznych instalacji zidentyfikowanych w wyniku zastosowania procedur przesiewowych – są właściwe.
- Opis procesów, w szczególności metod eksploatacyjnych.
- Fizyczne, chemiczne, toksykologiczne charakterystyki i określenie rodzaju zagrożenia dla człowieka i środowiska zarówno natychmiastowego, jak i opóźnionego.
- Fizyczne i chemiczne zachowanie w normalnych warunkach użytkowania oraz w możliwych do przewidzenia warunkach awaryjnych.

5.6 Identyfikacja zagrożeń

W celu identyfikacji zagrożeń wykorzystuje się szereg technik, takich jak: HAZID (*hazard Identification*), HAZOP (*hazard and operability study*), HAZAN (*hazard analysis*), FMEA (*failure mode and effects analysis*) i inne. Zasadniczo są one stosowane dla celów związanych z bezpieczeństwem i wymagają pewnego rozszerzenia, aby mogły być stosowane w odniesieniu do zagrożeń środowiskowych. Na przykład można opracować słowa kluczowe HAZOP specyficzne dla zagrożeń środowiskowych, takie jak „skutki środowiskowe”, „wody pogańnicze” i inne.

Analiza ryzyka środowiskowego powinna identyfikować wszystkie zdarzenia zapoczątkowujące awaryjne uwolnienia substancji niebezpiecznych do środowiska, przy użyciu informacji o zdarzeniach historycznych, z drzew błędów i tym podobnych źródeł, jak w analizie bezpieczeństwa. Należy rozważyć zarówno przyczyny wewnętrzne, jak i zewnętrzne w stosunku do miejsca zdarzenia.

5.7 Ocena zasięgu i ciężkości skutków zidentyfikowanych poważnych awarii

Ocena skutków awarii w odniesieniu do człowieka oraz środowiska stanowi zasadniczy etap ogólnego procesu oceny ryzyka, a raport o bezpieczeństwie powinien zawierać streszczenie (podsumowanie) oraz udokumentowanie wniosków wynikających z tego etapu oceny.

Ocena skutków zamieszczona w raporcie o bezpieczeństwie jest wykorzystywana do dwóch różnych rodzajów procesów decyzyjnych:

1. Ocena skutków stanowi niezbędną część systematycznej oceny ryzyka, której celem jest identyfikacja (określenie) oraz ustanowienie technicznych/organizacyjnych zabezpieczeń służących zapobieganiu zagrożeniom poważnych awarii oraz ograniczaniu skutków awarii, lub której celem jest ocena skuteczności i prawidłowości podjętych środków zapobiegawczych.
2. Ocena skutków opisuje konsekwencje wybranych scenariuszy, co stanowi informację niezbędną do opracowania zewnętrznych planów operacyjno-ratowniczych oraz do planowania zagospodarowania terenów wokół zakładów.

Modelowanie skutków poważnych awarii opiera się na kilku grupach danych wejściowych, takich jak:

- właściwości fizyczne oraz niebezpieczne rozpatrywanych substancji (palność, toksyczność itp.),
- możliwości emisyjne (promieniowanie cieplne, nadciśnienie),
- charakterystyki uwolnień (ilość, postać fizyczna, warunki itp.) oraz
- warunki pogodowe.

Tego rodzaju modelowanie przeprowadza się w odniesieniu do poszczególnych, najbardziej prawdopodobnych grup scenariuszy odniesienia.

5.8 Przedstawienie wyniku ogólnego

Raport o bezpieczeństwie powinien przedstawiać wyniki oraz dowody odnoszące się do analizy zagrożeń i oceny ryzyka. Należy w nim wyraźnie wskazać dokumenty, które zawierają informacje o przyjętych założeniach oraz o zastosowanych kryteriach oceny. Zidentyfikowane scenariusze awarii, ich skutki i prawdopodobieństwo oraz rozpoznane zdarzenia inicjujące powinny być klarownie udokumentowane, tak aby mogły być wykorzystane do przygotowania podstaw do dalszych procesów decyzyjnych²⁵.

6. Podsumowanie

Z analizy zebranego materiału wynika, że:

- Relatywnie niewielkie ilości niebezpiecznych substancji powodowały często poważne zniszczenia środowiska.
- Składowiska i magazyny chemikaliów rolniczych, ze względu na magazynowanie substancji czynnych biologicznie, mogą być miejscem wystąpienia zdarzeń, które noszą znamiona awarii niebezpiecznych dla środowiska.
- Substancje ropopochodne, choć częściej niż inne substancje występują w awariach wywołujących skutki dla środowiska, powodują mniejsze od nich szkody (przy udziale porównywalnych ilości substancji).
- W celu oszacowania ryzyka środowiskowego powinno się stosować modele rozprzestrzeniania się skażeń w środowisku wodnym i glebowym.

Literatura

- Bernatík A. *Prevence závažných havárií II*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava Fakulta bezpečnostního inženýrství, Ostrava 2006.
- Borysiewicz M., Furtek A., Potemski S., *Poradnik metod ocen ryzyka związanego z niebezpiecznymi instalacjami procesowymi*, Instytut Energii Atomowej, Świerk 2000.
- Borysiewicz M., Kacprzyk W., Romańczak A., Rymwid-Mickiewicz K., *Środki zapobiegawcze i ograniczające w planowaniu przestrzennym – Raport Projektu River Shield*”, Instytut Ochrony Środowiska, Warszawa 2008.
- Guidance on the Interpretation of Major Accident to the Environment for the Purposes of the COMAH Regulations*, Department of Environment, Transport and the Regions, Londyn 1999.

²⁵ jw.

- Markowski S., Pawlak P., Pietrzykowski M., Żyła R., *System ekspercki generowania scenariuszy awaryjnych w zakładach dużego ryzyka*, Politechnika Łódzka, Katedra Inżynierii Bezpieczeństwa Pracy, Łódź 2012.
- Norsk Standard, *Risk Criteria* (1995).
- Reducing Risks, Protecting People – HSE’s Decision-Making Process*, Health and Safety Executive, Norwich 2001.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 18 maja 2016 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie poważnych awarii objętych obowiązkiem zgłoszenia do Głównego Inspektora Ochrony Środowiska (Dz.U. z 2016 r., poz. 799).
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 grudnia 2002 r. w sprawie poważnych awarii objętych obowiązkiem zgłoszenia do Głównego Inspektora Ochrony Środowiska (Dz.U. z 2003 Nr 5, poz. 58).
- Ustawa z dnia 20 lipca 1991 r. o Inspekcji Ochrony Środowiska (Dz.U. z 1991 r. Nr 77, poz. 335 z późn. zm.).
- Wytyczne dotyczące sporządzania raportu o bezpieczeństwie według wymogów dyrektywy 96/82/WE, zmienionej przez dyrektywę 2003/105/WE (Seveso II)*, L. Fabbri, M. Struckl, M. Wood (red.), CIOP-PIB, Warszawa 2010.

ROZDZIAŁ VII.

**RAT-if – PROGRAM
DO OCENY RYZYKA
WYSTĄPIENIA AWARII
W OBIEKTACH PRZEMYSŁOWYCH
STWARZAJĄCYCH ZAGROŻENIE
POZA SWOIM TERENEM**

Bogusław Bieniak, Angelika Bojar,
Konrad Malik, Piotr Sałkowski

BERA Systems Sp. z o.o.

1. Wprowadzenie

Program RAT-if (ang. *Risk Assessment Toolbox at Hazardous Industrial Facilities Posing Threat Outside their Area*) powstał w ramach projektu EVARIS, którego celem było przygotowanie programu do oceny ryzyka wystąpienia awarii w obiektach przemysłowych stwarzających zagrożenie poza swoim terenem. Utworzone narzędzie pozwala na identyfikację zagrożeń wynikających z użytkowania substancji niebezpiecznych w obiektach przemysłowych. Dzięki możliwości obliczania zasięgów skutków awarii oraz wyznaczania bezpiecznych odległości obiektów przemysłowych w stosunku do otaczających obiektów i terenów, umożliwia również ocenę przyszłych zagrożeń, wspomagając tym samym bezpieczne planowanie zagospodarowania terenów pod inwestycje. Jest to możliwe dzięki wizualizacji skutków awarii na mapie.

2. Zastosowana technologia

Część biznesowa programu RAT-if została zrealizowana w technologii Java Enterprise Edition. Jedną z jej zalet jest niezależność od platformy sprzętowej. Charakteryzuje się ona również wysoką elastycznością, dzięki czemu utworzony program będzie mógł być szybko rozwijany w przyszłości. Część interfejsu użytkownika napisano natomiast w języku Java Script. Użyto również języka HTML, CSS, bibliotek Bootstrap, Leaflet oraz Plotly. Dostęp do programu realizowany jest przez przeglądarkę internetową.

3. Zastosowanie programu RAT-if

Główną korzyścią płynącą z pracy programu jest możliwość identyfikacji zagrożeń wynikających z użytkowania substancji niebezpiecznych w obiektach przemysłowych. Oprócz obliczania skutków awarii, system umożliwia również wyznaczanie tzw. „bezpiecznych odległości”, które powinny być zachowane, aby zapewnić bezpieczeństwo obiektom znajdującym się w otoczeniu zakładu składującego substancje niebezpieczne. Tym samym system może wspomagać planowanie zagospodarowania przestrzennego.

4. Funkcjonalność programu RAT-if

RAT-if jest narzędziem pozwalającym na ocenę ryzyka awarii w obiektach przemysłowych na podstawie wprowadzanych danych oraz przeprowadzanych symulacji scenariuszy awaryjnych.

Program nanosi wyniki przeanalizowanych scenariuszy na mapę Polski. Aby było to możliwe, posłużono się biblioteką map Leaflet. Wykorzystano również bazę danych obiektów topograficznych (BDOT10k), prowadzoną oraz udostępnioną przez Główny Urząd Geodezji i Kartografii (GUGiK). Obiekty BDOT10k zostały zgrupowane ze względu na ich właściwości w określonych warstwach. Dodatkowo zastosowany został Krajowy Rejestr Urzędowy Podziału Terytorialnego Kraju, dzięki czemu w programie możliwe jest wyróżnienie na mapie województw, powiatów, gmin, miejscowości oraz ulic. W programie przewidziano funkcję aktualizacji danych BDOT10k i podziału terytorialnego, co daje możliwość pracy na aktualnych danych, udostępnianych przez GUGiK.

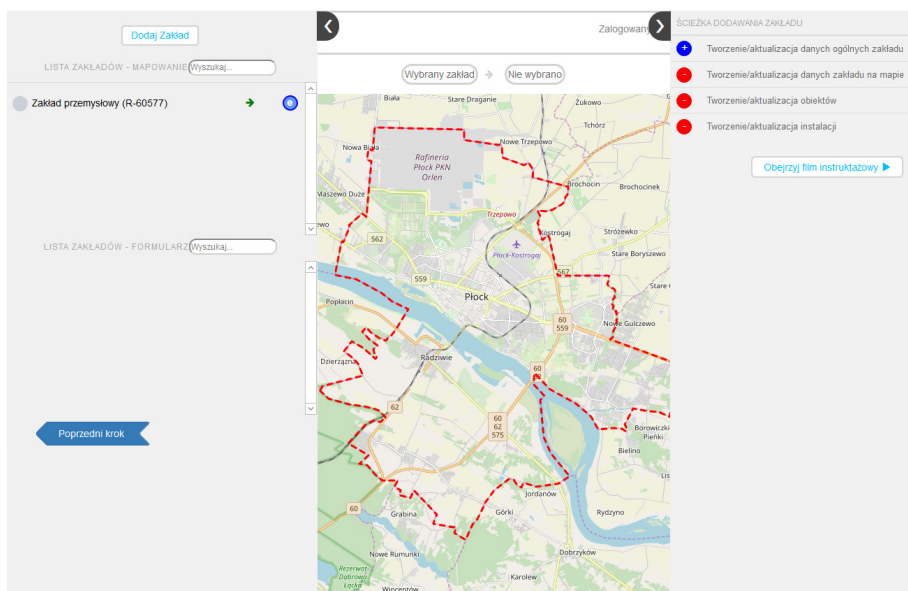
Do rozpoczęcia pracy z systemem konieczne jest założenie konta użytkownika. Po poprawnym ukończeniu procesu aktywacji konta, z nadanymi odpowiednio przez administratora systemu uprawnieniami, można rozpocząć pracę z aplikacją. Uprawnienia w aplikacji są podzielone na role oraz dostępy. Każdemu z użytkowników odpowiednio przydziela się rolę krajową, wojewódzką oraz powiatową, natomiast typy dostępu do aplikacji to kolejno edycja, podgląd oraz brak dostępu.

Po pierwszym zalogowaniu się do systemu użytkownikowi wyświetlana jest propozycja pracy z tzw. „samouczkiem”, który prowadzi użytkownika „krok po kroku” przez aplikację, pokazując na każdym ekranie „kroki”, które użytkownik może lub musi wykonać, aby przejść dalej. Jeśli użytkownik nie chce korzystać z podpowiedzi „samouczka”, może go wyłączyć. „Samouczek” można wywołać z menu górnego w każdej chwili podczas pracy z programem. Użytkownik, który ominął „samouczek” może do niego wrócić poprzez aktywowanie go w zakładce „Moje Konto”. Drugim elementem wspomagającym pracę użytkownika są filmy instruktażowe, znajdujące się na każdej podstronie aplikacji, pokazujące poprawną pracę z systemem. Te dwa elementy usprawniające pracę z programem są dedykowane w szczególności użytkownikom, którzy rozpoczynają korzystanie z aplikacji. Każdy z użytkowników posiadający konto w aplikacji w przypadku utraty hasła może je przywrócić poprzez panel do odzyskiwania hasła, znajdujący się na podstronie logowania. Po wpisaniu adresu e-mail, na konto użytkownika zostanie wysłana wiadomość elektroniczna zawierająca link aktywacyjny do konta.

Dwa główne etapy działania programu to mapowanie i analiza.

Interfejs użytkownika został przygotowany w sposób ułatwiający pracę z programem. Główny widok stanowi mapa Polski. W przypadku pracy z obiektami znajdującymi się w konkretnym powiecie, prezentowana będzie mapa tego powiatu. W aplikacji zostały dodane rozwijane panele boczne (zob. ryc. 1). Lewy panel

to miejsce, w którym wykonuje się pożądaną bieżącą akcję, przechodzi krok dalej lub wstecz w programie. Prawy panel to lista podstron dla mapowania lub analizy. Na tej liście użytkownikowi pokazywane jest, na której podstronie aktualnie się znajduje. Możliwe jest również cofnięcie się do wybranej podstrony bez konieczności cofania się po jednym kroku. W przypadku ukończonego mapowania lub ukończonej analizy przy użyciu prawego panelu rozwijanego możliwe jest przeniesienie się do dowolnej podstrony. Dzięki temu możliwy jest szybki dostęp np. do wyników przeprowadzonej i ukończonej analizy.



Ryc. 1. Widok przykładowej podstrony aplikacji RAT-if z rozwiniętymi panelami bocznymi
Źródło: opracowanie własne.

4.1 Mapowanie

Mapowanie to przyporządkowanie do określonego obszaru, na którym znajdują się obiekty pochodzące z BDOT10k, obiektów oraz instalacji definiowanych przez użytkownika.

Mapowanie polega na zaznaczaniu na mapie badanego obszaru, na którym znajduje się zakład przemysłowy wraz z instalacjami zawierającymi niebezpieczne substancje oraz obiekty BDOT10k. Utworzenie mapowania jest konieczne do przeprowadzenia analizy ryzyka.

Użytkownik ma możliwość tworzenia nowych mapowań lub pracy na istniejących już mapowaniach przygotowanych przez siebie. Mapowania innych użytkowników są dostępne, pod warunkiem, że posiadają one status mapowań publicznych. Użytkownik może pracować również na mapowaniu prywatnym, które

będzie niewidoczne dla pozostałych użytkowników programu. Mapowania publiczne mogą zostać wykorzystane przez użytkowników do tego upoważnionych, posiadających konkretne uprawnienia oraz dostęp w trybie edycji.

Pierwszym zadaniem, które użytkownik musi wykonać, aby utworzyć mapowanie w aplikacji jest dodanie zakładu (obiektu przemysłowego) lub wskazanie już istniejącego na mapie zakładu, w którym na etapie dalszej pracy będzie można przeprowadzić analizę scenariuszy awaryjnych. Dodany raz zakład jest widoczny dla wszystkich użytkowników programu. Możliwe jest utworzenie wielu mapowań dla jednego zakładu.

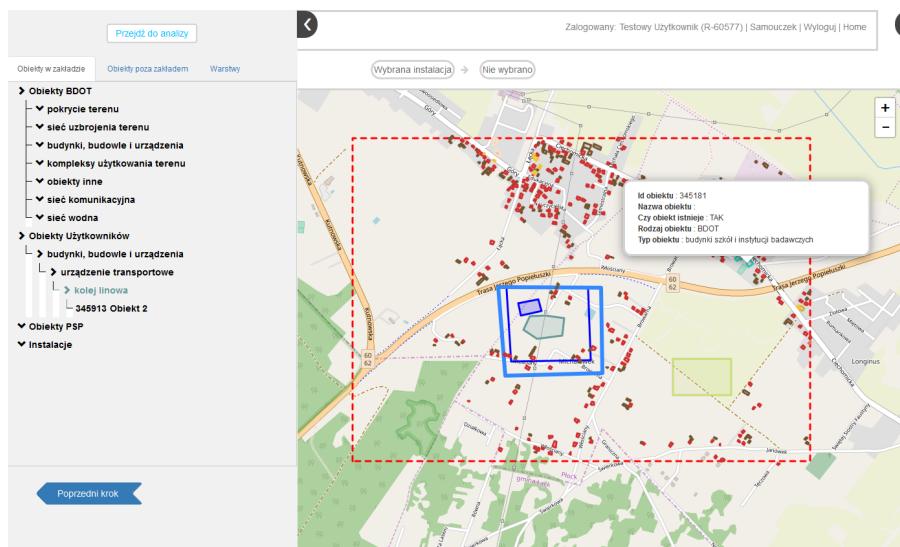
Przy prowadzeniu do systemu nowego zakładu należy wpisać jego dane, przypisać mu prowadzącego – wprowadzić nowego prowadzącego lub wybrać z listy dodanych już prowadzących – zakreślić na mapie zajmowany przez zakład teren oraz nanieść punkt, w którym znajduje się brama wjazdowa. Następnie użytkownik określa obszar mapowania, czyli teren, dla którego będą prowadzone i wizualizowane analizy oraz obszar samego zakładu. Obszar mapowania musi objąć cały teren zakładu oraz tereny do niego przyległe. W następnym kroku użytkownik ma możliwość wyświetlenia istniejących obiektów zawartych w danych BDOT10k. Zaznaczając do wyświetlania wybrane warstwy BDOT10k, użytkownik może przeanalizować, jakiego rodzaju obiekty znajdują się na terenie zakładu, jak również w jego sąsiedztwie. Może je edytować poprzez zmianę ich kształtu, powierzchni, nazwy, typu, innych parametrów – jak dane populacyjne czy wartość obiektu – lub też usunąć na potrzeby przeprowadzanej symulacji. Użytkownik ma także możliwość dodawania własnych obiektów. Aby to wykonać, musi narysować obiekt na mapie, a następnie uzupełnić w formularzu jego nazwę i typ, zgodnie z klasyfikacją obiektów BDOT10k.

Dla ułatwienia pracy udostępniono użytkownikowi możliwość duplikowania obiektów wraz ze wszystkimi określającymi je parametrami. Użytkownik może dodać lub usunąć dowolną liczbę obiektów na terenie zakładu lub poza jego terenem. Jedynym ograniczeniem jest obszar mapowania. Obiekty w aplikacji dzielimy na te znajdujące się w zakładzie (dla nich nie trzeba dodawać lokalizacji, ponieważ jest ona przepisywana z zakładu) oraz obiekty poza zakładem. Typy obiektów na terenie mapowania to obiekty zewnętrzne (BDOT10k), obiekty użytkownika oraz obiekty stworzone przez PSP.

Ostatnim krokiem mapowania jest dodanie instalacji zawierającej substancję niebezpieczną. Instalacje mogą mieć kształt okręgu, prostokąta, wielokąta lub linii. Po narysowaniu instalacji na mapie należy uzupełnić jej dane, w szczególności wskazać z dostępnej listy znajdującą się w niej substancję niebezpieczną oraz określić jej maksymalną ilość, temperaturę oraz kubaturę zbiornika. Należy również podać wartość instalacji. Aplikacja pozwala na umieszczenie w jednej instalacji większej liczby substancji. W jednym zakładzie może znajdować się wiele instalacji. Wszystkie instalacje przed ukończeniem mapowania muszą znajdować się na uprzednio określonym terenie mapowania. Każdą z instalacji – tak jak obiekt

– można edytować, transformować czy też duplikować, jedynym ograniczeniem jest teren mapowania.

Wynikiem powyższych kroków jest mapowanie, czyli zwiualizowany na mapie zakład, na terenie którego znajdują się instalacje z substancjami niebezpiecznymi, inne obiekty w zakładzie oraz w jego sąsiedztwie oraz zdefiniowany obszar, w którym badane będą skutki awarii mogącej wystąpić w danym zakładzie. Przykład takiego mapowania przedstawia ryc. 2.



Ryc. 2. Mapowanie z dodanym zakładem, obiektami oraz instalacją

Źródło: opracowanie własne.

Na tak przygotowanym mapowaniu można przeprowadzić analizę skutków awarii w danym zakładzie.

Program daje możliwość tworzenia mapowania w kilku etapach. Oznacza to, że osoba pracująca z oprogramowaniem nie musi od razu ukończyć swojego mapowania. Może zacząć od wprowadzenia części elementów, przerwać pracę z programem i wrócić do niej po jakimś czasie, nie tracąc wprowadzonych wcześniej danych. Jej mapowanie będzie miało wówczas status nieukończonego. Pozostałe dane można dodać w późniejszym czasie. Jednak, jeśli użytkownik programu chce przejść do etapu analizy, należy ukończyć mapowanie. Oczywistym wymogiem, niezbędnym do przeprowadzenia analizy w programie, jest określenie w mapowaniu instalacji z substancją niebezpieczną. Nie można bowiem analizować ryzyka uwolnienia substancji, której nie ma. Użytkownik ma możliwość przeprowadzenia analizy z wykorzystaniem mapowania prywatnego. W przypadku zmiany statusu mapowania na publiczne będzie ono dostępne również dla analiz prowadzonych przez innych uprawnionych do tego użytkowników.

4.2 Analiza

Analiza to określenie poszczególnych zagrożeń, które mogą wystąpić na badanym obszarze; wskazanie mechanizmów, poprzez które te zagrożenia mogą spowodować niepożądane zdarzenia oraz ocena skutków tych zdarzeń z określeniem prawdopodobieństwa/ryzyka wystąpienia konkretnego skutku. Innymi słowy, jest to część programu, w której użytkownik przeprowadza symulację awarii w zakładzie. Dzięki niej możliwe jest oszacowanie zagrożenia spowodowanego uwolnieniem substancji niebezpiecznej.

Do przeprowadzenia analizy w systemie RAT-if wykorzystywane są utworzone wcześniej przez użytkowników mapowania. Aby rozpocząć proces analizy, należy wybrać zakład i mapowanie utworzone dla tego zakładu.

Użytkownik może wykonać nową analizę i podać wszystkie jej parametry. Jeżeli jednak dla wybranego zakładu i mapowania istnieją już inne analizy, można wybrać taką analizę i przechodząc przez kolejne kroki w jej definiowaniu zmienić niektóre wprowadzone dane, zapisać jej kopię i wykonać obliczenia na nowym zestawie parametrów scenariusza. Użytkownik może więc utworzyć wiele analiz dla tego samego zakładu i mapowania. Wystarczy zmienić jeden z parametrów scenariusza awaryjnego (np. ilość uwolnionej substancji), aby otrzymać obraz różnych wariantów zagrożenia.

Rozpoczynając etap analizy, należy wskazać co najmniej jedną instalację zawierającą substancję niebezpieczną. Następnie należy wybrać jeden lub więcej scenariuszy analizy. Użytkownik może wykorzystać generyczną bazę scenariuszy oraz scenariusze MIMAH. W następnym kroku użytkownik wybiera – z dostępnych w aplikacji – scenariusze dla danej instalacji, które będzie chciał przeliczyć. Może wybrać jeden lub więcej scenariuszy. Niektóre z nich wymagają wskazania na mapie, a konkretnie w wybranej instalacji punktu uwolnienia substancji – np. pożar strumieniowy czy dyspersja. Istnieje również możliwość dodania nowego scenariusza. W tym celu po otwarciu formularza należy wprowadzić nazwę dodawanego scenariusza, opcjonalnie wprowadzić opis. Dalej wybrać instalację, dla której scenariusz będzie miał być przeliczony, model (do wyboru Aloha, VCE, NAPL, Water Transport) oraz związek chemiczny spośród tych znajdujących się w wybranej instalacji.

Kolejnym parametrem uwzględnianym w obliczeniach skutków awarii w zakładzie przemysłowym są warunki meteorologiczne. Użytkownik wybiera poniższe parametry:

- wysokość pomiaru danych,
- uwzględniane pory dnia,
- uwzględniane pory roku

a dalej dane meteorologiczne dla wybranych warunków:

- temperaturę powietrza,
- wilgotność powietrza,
- zachmurzenie,

- kierunek wiatru,
- prędkość wiatru,
- częstość występowania wiatru.

Dane meteorologiczne dla wybranych warunków można wprowadzić ręcznie, lub też pobrać z danych najbliższej stacji meteorologicznej.

W kolejnym kroku ustalana jest częstość występowania awarii. Program prezentuje wartości domyślne, jednak użytkownik ma możliwość zmodyfikowania tych danych.

Następnym etapem jest modelowanie skutków. Użytkownik przegląda listę ze wszystkimi wybranymi przez siebie scenariuszami. Wprawdzie dla każdego scenariusza program wpisuje wartości domyślne, jednak aby panować nad tymi danymi, użytkownik winien otworzyć każdy scenariusz, zweryfikować dane, w razie potrzeby zmodyfikować je i zatwierdzić. Po zapisaniu ustawień dla wszystkich scenariuszy można rozpocząć obliczenia. W zależności od liczby oraz rodzaju wybranych scenariuszy, obliczenia mogą potrwać dłuższy czas. Użytkownik nie musi oczekiwać na ich ukończeniu. Może w tym momencie przerwać pracę z programem, wrócić za jakiś czas i sprawdzić, czy obliczenia zostały ukończone. Gdy tak się stanie, na ekranie wyświetli się informacja o ukończeniu obliczeń oraz o tym, jaki procent wybranych scenariuszy został policzony poprawnie. Może się okazać, że niektóre obliczenia zakończą się błędem, zazwyczaj związanym z niepoprawnymi danymi wprowadzonymi przez użytkownika. Aplikacja przelicza skomplikowane dane, których poprawne wprowadzenie wymaga wiedzy eksperckiej. Jeśli okaże się, że w którymś miejscu dane zostały wprowadzone błędnie, istnieje możliwość pobrania pliku symulacji w celu przeanalizowania powodu zwrócenia błędu.

Dalej użytkownik przegląda listę poprawnie policzonych scenariuszy. Po kliknięciu jednego z przeliczonych scenariuszy na mapę zostanie naniesiony wynik, czyli zaznaczone odmiennymi kolorami obszary różnych (przedziałów) wartości obliczonego ryzyka. Można otworzyć okno z bardziej szczegółową prezentacją wyniku obliczeń danego scenariusza wraz z legendą. Użytkownik może przeanalizować przebieg obliczeń dla danego scenariusza. Może również pobrać pliki źródłowe lub eksportować do pliku wyniki obliczeń.

Dalej użytkownik ma wybór typów ryzyka, które chce uwzględnić w swojej analizie. Dostępne są następujące typy ryzyka:

- ryzyko lokalne,
- ryzyko indywidualne,
- ryzyko społeczne,
- matryce ryzyka,
- bezpieczne odległości.

Należy zaznaczyć co najmniej jeden typ ryzyka, a następnie dla każdego wybranego typu wybrać przynajmniej jeden z policzonych scenariuszy.

Dla każdego wybranego typu ryzyka użytkownik określa wymagane parametry przypisanego mu scenariusza. Przykładowo, dla matryc ryzyka będzie to m.in. licz-

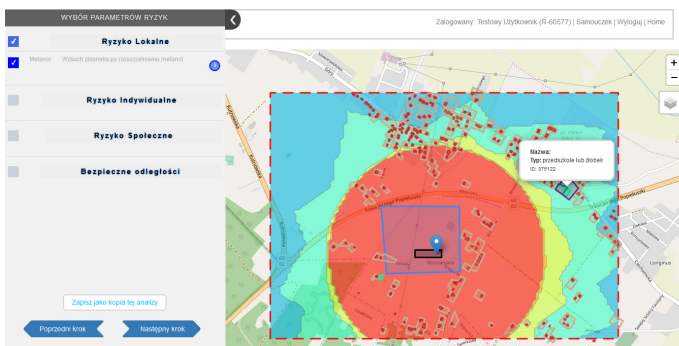
ba kategorii skutków określających skalę następstw awarii. Konieczne jest również uzupełnienie danych populacyjnych. W odpowiednim oknie, po zaznaczeniu na mapie określonego obszaru, wprowadzane są informacje o tym, ile osób z danej kategorii przebywa na tym obszarze w zależności od pory roku lub pory dnia. W programie RAT-if zostało ustalonych 5 domyślnych kategorii ludności:

- rezydenci,
- studenci/uczniowie,
- pracownicy,
- klienci sklepów/galerii/centrów rozrywki,
- turyści.

Istnieje możliwość zdefiniowania własnej kategorii albo usunięcia kategorii niepotrzebnej. Jediną kategorią, której nie można usunąć są pracownicy.

Po wprowadzeniu niezbędnych danych użytkownik dokonuje prezentacji typów ryzyka. Może obejrzeć wszystkie wyniki zwizualizowane na mapie. Wyniki, których przedstawienie na mapie nie jest możliwe, np. matryce ryzyka, wyświetlane są w formie tabeli. Po zaznaczeniu w lewym panelu kolejnych typów ryzyk użytkownik zobaczy na mapie wyniki nałożone na siebie. Istnieje również możliwość obejrzenia wyników dla każdego typu ryzyka w osobnym oknie. W przypadku ryzyka indywidualnego pokazany zostanie wynik z określeniem wartości indywidualnego ryzyka zgonu dla wybranej kategorii ludności. Z kolei po wybraniu bezpiecznych odległości zostanie zaprezentowana mapa z podziałem na strefy dopuszczalności zabudowy oraz wskazane obiekty, które znajdują się w niedopuszczalnych strefach zabudowy.

Ostatnim punktem analizy jest prezentacja ryzyka sumarycznego, czyli łączny wynik scenariuszy dla danego typu ryzyka. Przykładowy wynik obliczeń w aplikacji po uwolnieniu metanolu obrazuje ryc. 3. Po ukończeniu analizy jej wyniki zostają zapisane w bazie. W każdej chwili można do nich powrócić lub utworzyć nową analizę na podstawie kopii zapisanej analizy. Dzięki temu można przeprowadzić symulację dla wybranych scenariuszy, zmieniając jedynie wybrane parametry, bez konieczności tworzenia całej analizy od początku.



Ryc. 3. Przykładowy wynik obliczeń, obrazujący ryzyko lokalne po uwolnieniu metanolu

Źródło: opracowanie własne.

Jeśli po przeprowadzeniu analizy użytkownik uzna, że zagrożenie jest tak duże, że z pewnością wykracza poza zdefiniowany przez niego obszar mapowania i chce sprawdzić jego skutki na większym obszarze, może utworzyć kopię danego mapowania oraz określić nowy obszar mapowania obejmujący większy teren wokół zakładu, co pozwoli na przeanalizowanie zagrożenia na większym terenie.

5. Podsumowanie i wnioski

Aktualna postać programu RAT-if jest wynikiem kilkuletniej pracy konsorcjum składającego się z pracowników Narodowego Centrum Badań Jądrowych, Centrum Naukowo-Badawczego Ochrony Przeciwpożarowej, Politechniki Warszawskiej oraz firmy BERA Systems Sp. z o.o. Opracowane modele matematyczne zostały zaimplementowane do aplikacji umożliwiającej przeprowadzenie symulacji zagrożeń wynikających z użytkowania substancji niebezpiecznych w zakładach przemysłowych. W czasie trwania projektu aplikacja była testowana i dostosowywana do bieżących wymagań. Testom poddano również interfejs, zaprojektowany tak, aby był przyjazny dla osób korzystających z narzędzia. Do programu wprowadzane są skomplikowane dane, wymagające znajomości wielu czynników mających wpływ na skalę zagrożenia, dlatego zostały zastosowane funkcjonalności wspomagające pracę nowego użytkownika systemu.

Dzięki możliwości wprowadzania do programu dowolnych zakładów oraz obiektów znajdujących się w jego pobliżu, realne jest przeanalizowanie skali potencjalnego zagrożenia dla nieistniejących jeszcze zakładów przemysłowych, dzięki czemu możliwa jest identyfikacja nie tylko zakładów o dużym ryzyku oraz o zwiększonym ryzyku, ale wszystkich istniejących lub mających dopiero powstać. Po przeprowadzeniu takiej symulacji aplikacja wizualizuje na mapie bezpieczne odległości, w jakich można umiejscowić planowaną inwestycję, jak również zlokalizowanie obiektów wokół zakładu. Interpretacja wyników symulacji scenariuszy awaryjnych pozwala na zastosowanie szybszych metod reakcji i zapewnienie bezpieczeństwa wokół zakładów przemysłowych.

Bazy danych oprogramowania zostały zaprojektowane w taki sposób, że mogą być uzupełniane o kolejne substancje niebezpieczne. Aplikacja jest bardzo rozwojowa, ponieważ celowo została zaprojektowana w technologii, która pozwala na rozszerzanie jej o kolejne funkcjonalności w przyszłości.

„Umiejętność oceny ryzyka wystąpienia awarii w obiektach przemysłowych stwarzających zagrożenie poza swoim terenem, mająca na celu poprawę bezpieczeństwa w takich obiektach, jest bardzo aktualna i ważna zarówno z technicznego, ekonomicznego, jak i społecznego punktu widzenia. Z tych powodów przedstawiona w monografii tematyka badawcza, realizowana w ramach projektu badawczego EVARIS, finansowanego przez NCBR, ma duże znaczenie praktyczne.”

Z recenzji prof. dr hab. inż. Joanny Karcz

„Niniejsza publikacja ma na celu przybliżenie wyników badań prowadzonych na rzecz poprawy bezpieczeństwa w zakładach przemysłowych, realizowanych w ramach projektu nr DOB-BIO7/09/03/2015 finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju pt. „Program do oceny ryzyka wystąpienia awarii w obiektach przemysłowych stwarzających zagrożenie poza swoim terenem”. Projekt – realizowany pod akronimem EVARIS – wychodzi naprzeciw zapotrzebowaniu organów administracji publicznej oraz służb właściwych do rozpoznawania zagrożeń na narzędzie, pozwalające na: skuteczną identyfikację zakładów stwarzających ryzyko poza swoim terenem, wykonywanie operatów bezpiecznych odległości, a także wprowadzenie zasad zarządzania ryzykiem już na etapie tworzenia założeń do aktów planistycznych.”

Z wprowadzenia

ISBN 978-83-948534-7-1

DOI 10.17381/2020.1

