

st. kpt. inż. **Piotr LESIAK**
st. kpt. mgr inż. **Rafał POROWSKI**
Zespół Laboratoriów Procesów Spalania i Wybuchowości
Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwożarowej
im. Józefa Tuliszkowskiego -
Państwowy Instytut Badawczy

OCENA SKUTKÓW AWARII PRZEMYSŁOWEJ W INSTALACJACH PROCESOWYCH, W TYM EFEKTU DOMINO – CZĘŚĆ 1.

Assessment of physical effects for major hazard accidents in the process industries including domino effect – Part 1

Streszczenie

Zwiększanie mocy produkcyjnych w zakładach przemysłowych powiązane jest z ich stopniową rozbudową. Skutkuje, to generowaniem procesów inwestycyjnych i budową nowych instalacji procesowych, które bardzo często napotykać na ograniczenie związane z rozmiarami działek budowlanych. Pociąga to za sobą niekorzystną tendencję, w której inwestorzy i biura projektowe starają się maksymalnie zagospodarować teren pod inwestycje, zachowując jak najmniejsze odległości pomiędzy aparatami procesowymi, zbiornikami, itp. W przypadku zajścia zdarzenia awaryjnego na jednej instalacji przemysłowej, może dojść do przeniesienia i eskalacji skutków awarii na sąsiednią instalację i wystąpienia tzw. efektu Domino. Zdarzenia tego typu są bardzo niebezpieczne i w konsekwencji mogą prowadzić do olbrzymich zniszczeń na terenie całego zakładu lub jego części, a także poza jego terenem. W zależności od rozwoju sekwencji zdarzeń w scenariuszu awaryjnym, końcowym efektem skutków może być np. wybuch BLEVE-Fireball, wybuch przestrzenny, pożar powierzchniowy, pożar strumieniowy, itp. Towarzyszyć temu mogą różne formy oddziaływania fizycznego, w postaci odłamkowania, promieniowania cieplnego, czy fali nadciśnienia. Ich zasięg i potencjał niszczący ma zasadnicze znaczenie przy określaniu tzw. bezpiecznych odległości pomiędzy blokami instalacji już na etapie ich projektowania.

Artykuł ten został podzielony na cztery części. W części pierwszej autorzy przeanalizowali zdarzenia awaryjne, w których wystąpił efekt Domino. Zwrócono tutaj uwagę na skalę zjawisk zachodzących podczas tego typu awarii oraz towarzyszące im skutki. Opisano także kompleksowo definicje efektu Domino, które powstały w wyniku badań tego zjawiska. W ostatniej części artykułu przeanalizowano zagrożenia jakie towarzyszą zdarzeniom awaryjnym oraz przedstawiono rodzaje pożarów i wybuchów.

Summary

Production development in the process industries makes it larger wide-world. It makes a large number of investments and brand-new technological installations limited by land-use planning procedures. Investors and architects try to use minimum distances between particular vessels and apparatus to fulfill a regime of limited land-use planning. In case of failure events of installation it is possible to make an interaction of accidental results which can lead to domino effect. Such events are dangerous and can lead to huge damages of industrial plant or some part of installation, including external areas. Depend on failure event development it can result in BLEVE-Fireball, vapor cloud explosion, pool fire, jet fire, flash fire, etc. Physical effect in such scenario could be a generation of blast wave, thermal radiation or even fragmentation. The range of physical effects is prior in determination of safety distances in the process industries at the designing phase. This paper is divided into 4 parts. The first one includes the analysis of failure events where domino effect took place, including a scale of phenomena involving major-hazard accident. Complex definition of domino effect was described. At the last part of this paper some possible effects are assessed and several types of fires and explosions are showed.

Słowa kluczowe: strefy zagrożeń, substancje niebezpieczne, modelowanie awarii;

Keywords: dangerous zones, hazardous substances, industrial accident modeling;

Wprowadzenie

Od ponad stu lat następuje stały wzrost zapotrzebowania ludzi na wszelkie dobra, głównie konsumpcyjne. Aby zaspokoić popyt, zwiększane są zdolności produkcyjne zakładów i wytwarzanie różnego rodzaju surowców służących do wyrobu produktów, poczynając od najprostszyc przedmiotów codziennego użytku, po bardzo skomplikowane urządzenia. Wraz z rosnącą produkcją wzrasta równoległe zapotrzebowanie na projektowanie i budowę różnego rodzaju instalacji przemysłowych, których liczba zwiększa się z roku na rok na całym świecie, zwłaszcza w krajach rozwijających się. Ponadto, zmniejszające się zasoby surowców nieodnawialnych powodują konieczność stosowania coraz bardziej złożonych procesów technologicznych w celu osiągnięcia maksymalnej wydajności produkcyjnej. Sytuacja taka wiąże się z zastosowaniem w zakładach przemysłowych wyszukanych metod prewencji i złożonych systemów zabezpieczeń w celu zminimalizowania możliwości wystąpienia zdarzeń awaryjnych lub zminimalizowania skutków tych zdarzeń.

Celem niniejszej pracy jest próba opisania najbardziej przydatnej w praktyce metody analizy ryzyka i oceny skutków awarii, w tym efektów domina dla wybranej instalacji mogącej znaleźć się w zakładzie o dużym ryzyku wystąpienia poważnej awarii przemysłowej. Wyniki pracy mogą zostać wykorzystane w części analitycznej raportu o bezpieczeństwie, w którym ocena skutków awarii, w tym efektów domino stanowi najważniejszą jego część.

W drugiej połowie XX wieku zwiększyła się liczba awarii przemysłowych niosących ze sobą katastrofalne skutki, co zwróciło uwagę opinii publicznej na zagrożenie ze strony dużych zakładów przemysłowych. Należy wspomnieć o awarii w Anglii (1974 r.) w miejscowości Flixborough lub we Włoszech w miejscowości Seveso (1976 r.).

Doświadczenia poczynione na gruncie tych zdarzeń stały się przyczyną do tego, aby w krótkim czasie stworzyć instrumenty prawne za pomocą, których można było skuteczniej nadzorować zakłady chemiczne, stosujące substancje niebezpieczne. Wspólnota Europejska uchwaliła Dyrektywę nr 82/501/EWG z 24 czerwca 1982 r. dotyczącą zapobiegania awariom przemysłowym, zwaną Dyrektywą Seveso I, nakładającą na zakłady chemiczne dodatkowe obowiązki, wśród których najważniejszym było przygotowywanie dla zakładu analizy bezpieczeństwa użytkowanej instalacji przemysłowej. 9 grudnia 1996 r. na gruncie nowych doświadczeń związanych m.in. z wystąpieniem awarii przemysłowych w Indiach w miejscowości Bhopal oraz w Meksyku w Mexico City w 1984 r. została dokonana przebudowa i rozszerzenie Dyrektywy Seveso I o nowe postanowienia. Znowelizowana dyrektywa, zwana Dyrektywą Seveso II, nałożyła na prowadzących zakłady przemysłowe obowiązki polegające m.in. na wykonywaniu oceny ryzyka możliwości wystąpienia zdarzeń awaryjnych, wprowadzaniu ponadnormatywnych zabezpieczeń oraz przygotowaniu się do działań zapobiegawczych oraz ratowniczych na wypadek wystąpienia zagrożeń ze strony prowadzonych

procesów przemysłowych. W dyrektywie tej wprowadzono także rozwiązanie mające na celu zminimalizowanie zagrożeń z tytułu bliskiej lokalizacji zakładów należących do różnych podmiotów, tzw. grup zakładów narażonych na wystąpienie efektu Domino. Obowiązek identyfikacji takich grup zakładów został nałożony na władze nadzorujące wprowadzanie w danym Państwie Członkowskim postanowień Dyrektywy Seveso II. Odpowiednie zapisy zawarte zostały w art. 8, w którym zobowiązano właściwe organy do tego, że wykorzystując informacje otrzymane od prowadzących zakład zidentyfikują zakłady lub grupy zakładów, w których prawdopodobieństwo lub skutki poważnych awarii mogą być wzmożone ze względu na ich lokalizację.

Obecnie cały czas toczą się prace nad doskonaleniem zapisów dyrektywy dotyczącej przeciwdziałaniu poważnym awariom przemysłowym. Mające miejsce awarie w Europie – 13 maja 2000 r. w Enschede w Holandii oraz 21 września 2001 r. w Tuluzie we Francji pokazały niedoskonałości środków prawnych służących do ograniczania lokalizacji obiektów cywilnych w stosunku do zakładów przemysłowych. Istotnym kolejnym krokiem w podnoszeniu jakości wspomnianych przepisów było wprowadzenie ograniczenia w lokalizacji budownictwa mieszkalnego oraz obiektów użyteczności publicznej w sąsiedztwie zakładów – odpowiednie zapisy zawarto w art. 12 znowelizowanej Dyrektywy Seveso II. Właśnie bezpośrednie sąsiedztwo mieszkalne stało się przyczyną wystąpienia licznych ofiar wśród ludzi oraz zniszczeń mienia podczas awarii wymienionych powyżej.

Podsumowując można stwierdzić, że dyrektywa przechodziła poważne zmiany, które stopniowo zostawały wprowadzane do jej zapisów. Posiłkując się doświadczeniami opartymi na zdarzeniach historycznych wdrożono istotne zapisy dotyczące warunków budowy zakładów we wzajemnym sąsiedztwie, ograniczające zabudowę obiektów cywilnych oraz nakazujące wzajemną wymianę informacji pomiędzy sąsiednimi zakładami.

Pomimo, że oszacowanie wzajemnego oddziaływania sąsiednich instalacji przemysłowych w przypadku awarii jest obowiązkiem prawnym, nie zostało ostatecznie zdefiniowane pojęcie efektu Domino. W obiegu jest wiele definicji tego pojęcia, jednak nie zostały określone jednolite kryteria, którymi można by się posługiwać przy szacowaniu tego zjawiska. Poniżej opisano różne definicje efektu Domino posługując się podejściem różnych krajów objętych obowiązkiem realizacji Dyrektywy Seveso II:

- Efekt domino to szereg następujących po sobie zdarzeń, w których skutki wcześniejszego zdarzenia powiększane są przez następujące po sobie kolejno zdarzenia wtórne, prowadząc w konsekwencji do zdarzeń końcowych.
- Efekt domino to efekt zachodzący wskutek istnienia równoległych bądź szeregowych zdarzeń związanych z uwolnieniem substancji niebezpiecznych lub określonego oddziaływania fizycznego na instalacji wtórnej, które powstaje w wyniku wystąpienia efek-

tów fizycznych na instalacji pierwotnej, znajdującej się w bezpośrednim otoczeniu instalacji wtórnej.

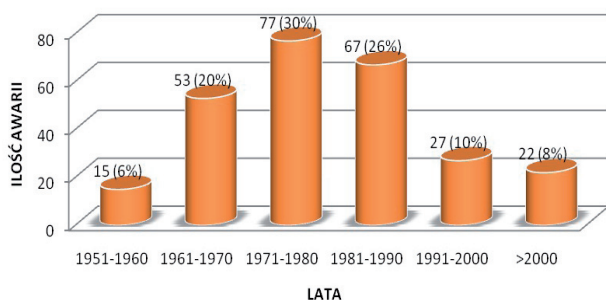
W obu wyżej wymienionych przypadkach stopniowe zwiększanie potencjału strat może być czasowe (tzn. rozciągnięte w czasie oddziaływanie skutków, np. uwolnienie substancji toksycznej) lub przestrzenne (tzn. oddziaływanie skutków awarii ma wymiar fizyczny, np. oddziaływanie fali nadciśnienia lub strumieniowania ciepłego). Naukowcy prowadzący badania nad przedmiotowym zjawiskiem, efekt domino definiują następująco:

- czynnik wzięty do obliczeń ryzyka, które może się zdarzyć w przypadku, gdy uwolnienie niewielkiej ilości substancji może prowadzić do eskalacji skutków pośrednio lub bezpośrednio przez to uwolnienie [1],
- utrata pewnego poziomu bezpieczeństwa instalacji, która prowadzi do eskalacji wypadków na sąsiednich instalacjach [2],
- zdarzenie polegające na uwolnieniu pewnej substancji niebezpiecznej do otoczenia, które zakłóci prace innych instalacji tak, że nastąpi eskalacja zdarzeń i rozprzestrzenienie się dalszych uwolnień [3].

Awarii przemysłowych z możliwym wystąpieniem efektu Domino było znacznie więcej w okresie rozwoju przemysłu chemicznego, tj. na przestrzeni 100 lat. Z danych zbieranych na cele statystyczne, zawartych m.in. w:

- Major Accident Reporting System – MARS, European Commission, Joint Research Centre, Ispra [5];
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) [6];
- FACTS Database for Industrial Safety, PC – Friends, TNO [7];
- A Fuzzy Approach to Accessing Accident Databases [8];
- Health and Safety Executive (HSE), United Kingdom [9];

Wynika, że zdarzeń tego typu można wytypować ok. 100. Za każdym razem niosły one za sobą poważne zniszczenia oraz wielokrotnie dochodziło do powstania dużej liczby rannych i zabitych. Jeśli chodzi o występowanie samych zdarzeń awaryjnych w określonych przedziałach czasu to przedstawione to zostało na Ryc. 1 [10].



Ryc. 1. Liczba zdarzeń awaryjnych w okresie od 1951 – do czasów współczesnych. [10]

Fig. 1. Number of failure events in the process industries between 1951 up to today's. [10]

Z powyższego wykresu wynika pewna tendencja, która spowodowana jest kilkoma czynnikami. Z jednej strony w początkowej fazie wzrostu ilości zdarzeń awaryjnych następowała jednoczesna poprawa dostępu do informacji, co można przełożyć na wzrost zdarzeń awaryjnych, które zostały zidentyfikowane. Z drugiej jednak strony należy mieć na uwadze to, że dynamicznie rosła liczba zakładów oraz ich rozmiar w związku ze zwiększaniem się zapotrzebowania na produkty po okresie II wojny światowej. Najwięcej zdarzeń awaryjnych odnotowano w latach 70-tych XX wieku. W okresie tym nastąpiła największa rozbudowa gałęzi przemysłu, co bezpośrednio przełożyło się na lepszy dostęp do informacji oraz zwróciło uwagę na problematykę związaną z efektem Domino. W ciągu dwóch ostatnich dziesięcioleci poprawy bezpieczeństwa, rozwoju technik analiz ryzyka przemysłowego oraz tworzenia prawa regulującego zagadnienia awarii przemysłowych doszło do znacznego zmniejszenia liczby wypadków w przemyśle.

Biorąc pod uwagę grupy krajów, w których w przeszłości dochodziło do zdarzeń awaryjnych z udziałem substancji niebezpiecznych to można wyszczególnić ich trzy kategorie:

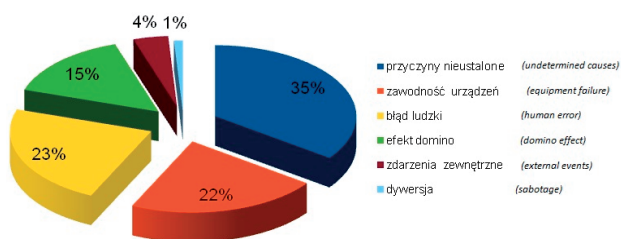
- kraje Unii Europejskiej – 24% wszystkich zdarzeń awaryjnych;
- Stany Zjednoczone, Kanada, Australia, Japonia, Nowa Zelandia – 57% wszystkich zdarzeń awaryjnych;
- reszta świata - 19% wszystkich zdarzeń awaryjnych.

Ogólnie rzecz biorąc wystąpienie zdarzeń awaryjnych nie determinuje jeszcze wystąpienia efektu Domino, jednak większość awarii nie składa się z jednego zdarzenia inicjującego tylko z kilku, kilkunastu etapów zachodzących równolegle lub szeregowo. Można powiedzieć, że każda awaria przemysłowa zachodzi wskutek wystąpienia pojedynczych, lokalnych efektów Domino, które prowadzą do eskalacji danego zdarzenia. Analiza danych zebranych przez HSE¹ w zakresie zależności wystąpienia awarii przemysłowej oraz efektu domina wykazała, że są to zjawiska wykazujące zależność.

Z uwagi na złożoność procesów chemicznych oraz skomplikowaną aparaturę przemysłową najczęściej nie daje się określić przyczyn niezależnych – stanowi to ok. 35% wszystkich zdarzeń. Drugą w kolejności przyczyną są awarie stricte techniczne, zakres ten należy do dziedziny określającej niezawodność urządzeń. Przyczyny te najczęściej wynikają z nieprawidłowego doboru materiału lub innych komponentów, np. uszczelki, zawory, połączenia i stanowią 22% wszystkich przyczyn awarii. Podobny udział procentowy określony został dla źródeł należących od niezawodności ludzkiej i zależy od popełnienia błędu ludzkiego począwszy od etapu opracowywania technologii

1 HSE – Health and Safe Executive jest to pozarządowa organizacja w Wielkiej Brytanii, która jest odpowiedzialna za wdrażanie i nadzorowanie przepisów dotyczących szeroko pojętego bezpieczeństwa w pracy.

produkcji poprzez projektowanie, montowanie i dobór urządzeń instalacji, aż po etapy przeglądów i wyłączenia instalacji – stanowi to 23% przypadków. Występujące efekty Domino należą do mniej licznej grupy przyczyn mogących spowodować awarię przemysłową. Stanowią one maksymalnie do 15% wszystkich przyczyn awarii w przemyśle. Przedostatnią grupą są tzw. zdarzenia warunkowane wewnątrznie i do tej grupy możemy zaliczyć przyczyny naturalne, np. pioruny, powódzie, silne wiatry oraz zdarzenia niezależnych jednostek np. zewnętrznej firmy transportowej (4%). Ostatnia grupa, najmniej liczna to sabotaże i działania wrogich jednostek (1%), co przedstawiono na Ryc. 2.



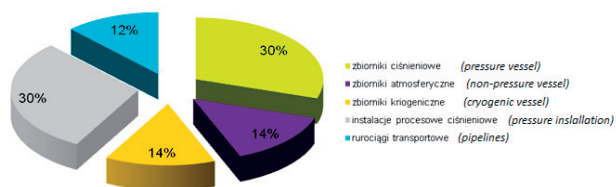
Ryc. 2. Udział procentowy poszczególnych przyczyn wystąpienia awarii przemysłowych. [11]

Fig. 2. Percentage of particular failure causes in the process industries. [11]

Biorąc pod uwagę instalacje, w których wystąpiła awaria przemysłowa, wraz z efektem Domino można określić, że miały one miejsce w następujących urządzeniach i aparatach procesowych:

- zbiorniki ciśnieniowe,
- zbiorniki atmosferyczne,
- zbiorniki kriogeniczne,
- instalacje procesowe ciśnieniowe
- rurociągi transportowe.

Na Ryc. 3 i 4 przedstawiono udział zdarzeń awaryjnych w poszczególnych instalacjach w rozróżnieniu na instalacje pierwotne, tj., takie, w których została zapoczątkowana awaria przemysłowa oraz (Ryc. 4.) instalacje wtórne, tj. takie, które są wrażliwe na oddziaływanie skutków awarii pochodzące z instalacji pierwotnej – czyli takie, na których może dojść do wystąpienia efektu domino.

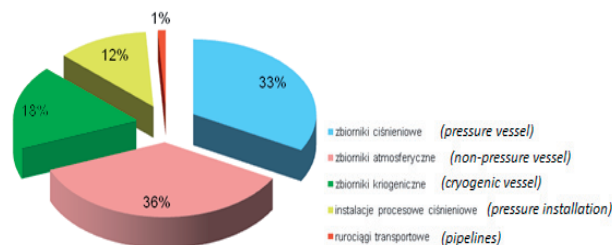


Ryc. 3. Udział poszczególnych instalacji, w których zostaje zapoczątkowana awaria przemysłowa. [11]

Fig. 3. Fraction of particular installations with initiation of major accident. [11]

Z zestawienia wykonanego na Rysunku 3 widać, że największy udział w instalacjach, w których najczęściej dochodzi do wystąpienia awarii są zbiorniki magazynowe

– w sumie 58 % biorąc pod uwagę zbiorniki ciśnieniowe, kriogeniczne oraz beciśnieniowe. Sytuacja taka ma miejsce, gdyż w tego typu instalacjach gromadzona są duże ilości substancji niebezpiecznych. Wniosek ten jest bardzo istotny z uwagi na przeprowadzoną w dalszych częściach artykułu ocenę ryzyka i oszacowanie skutków awarii oraz efektu domina.



Rys. 4. Udział poszczególnych instalacji w wystąpieniu efektu Domino. [11]

Fig. 4. Fraction of particular installation in Domino effect. [11]

Z danych przedstawionych na Rysunkach 3 i 4 wynika, że do instalacji przemysłowych najbardziej narażonych na oddziaływanie efektu Domino należą instalacje zbiornikowe (87%), a tym samym niosą ze sobą największy potencjał zagrożenia. Zarówno w przypadku możliwości wystąpienia zdarzenia awaryjnego, jak i oddziaływania efektu Domino potwierdza się, że decydującym czynnikiem jest ilość substancji niebezpiecznej, a nie prowadzone procesy technologiczne. Oczywiście, podczas omawiania wpływu czynników na „ciężkość” awarii przemysłowej nie można pominąć istotnej kwestii dotyczącej właściwości chemicznych i fizycznych substancji niebezpiecznych, które w wysokim stopniu wpływają na rodzaj skutków zdarzeń awaryjnych. Substancje te można podzielić na kilka grup:

- substancje toksyczne, np. środki ochrony roślin, fosgen, chlor,
- ciecze palne, np. ropa naftowa, alkohole,
- gazy palne, np. węglowodory,
- pozostałe substancje, które nie zostały zakwalifikowane do ww.

Dla każdej wyżej przedstawionej grupy substancji określono w Tabeli 1. [10] jej udział w mających miejsce awariach przemysłowych z uwzględnieniem ich udziału w efekcie domino.

Tabela 1.

Udział poszczególnych zdarzeniach awaryjnych z uwzględnieniem wystąpienia efektu domino. [10]

Table 1.

Fraction of failure events, including Domino Effect. [10]

Rodzaj (type)	Substancje toksyczne (toxic substances)	Ciecze palne (flammable liquids)	Gazy palne (flammable gases)	Pozostałe substancje (Other substances)	Suma (amount)
Liczba awarii	45	43	50	69	207
Liczba awarii, z co najmniej jednym efektem domino	7	21	29	23	80
Liczba awarii, z co najmniej dwoma efektami domino	2	8	14	10	34

Z Tabeli 1. oraz rysunków 3 i 4 wynika, że rodzaj substancji niebezpiecznej oraz sposób składowania/rodzaj instalacji mają istotny wpływ na liczbę awarii przemysłowych oraz efektów domina. Substancje należące do grupy gazów palnych, niosą za sobą największy potencjał niebezpieczeństwa zdarzeń awaryjnych. Wpływa na to również fakt, iż składowane są przede wszystkim, jako skroplone pod ciśnieniem, co podnosi czynnik niebezpieczeństwa procesu technologicznego. Natomiast substancje toksyczne nie wpływają w dominujący sposób na liczbę efektów domino. Podsumowując, można zauważyć, że w przypadku mniej więcej równej liczbie awarii przemysłowych udział gazów palnych jest dominujący, jeśli chodzi o liczbę powstałych efektów domino. W odniesieniu do substancji toksycznych udział ten się zmniejsza do ok. 15% udziału, czyli można przyjąć, że jest niewielki wobec ponad 50% udziału gazów palnych w możliwości utworzenia się efektu domino we wszystkich analizowanych zdarzeniach awaryjnych.

Analiza statystyczna pokazuje, że częstotliwość wypadków z efektem Domino spadła w ciągu ostatnich dwóch dekad. Najbardziej charakterystyczne zdarzenia awaryjne związane są z pożarem i wybuchem, a przyczyny ich wystąpienia uwarunkowane są błędami człowieka oraz uszkodzeniami mechanicznymi.

Charakterystyka zagrożeń związanych z wystąpieniem awarii przemysłowych

Zagrożenia w zakładach przemysłowych powstają wskutek uwolnienia niebezpiecznych substancji chemicznych do środowiska. Rodzaje zagrożeń, a tym samym rodzaj efektów fizycznych oraz skutków zależą od kilku składowych. Przede wszystkim od ilości i właściwości fizykochemicznych uwalnianej substancji, charakteru prowadzonego procesu, rodzaju uwolnienia oraz warunków atmosferycznych. Rozróżnia się trzy rodzaje zagrożeń powodujących eskalację skutków awarii przemysłowych:

- pożar – niekontrolowana, egzotermiczna reakcja substancji palnej z utleniaczem, zainicjowana źródłem zapłonu;
- wybuch – proces spalania połączony z gwałtownym wzrostem ciśnienia, powodujący powstanie rozprzestrzeniającej się fali spalania;
- skażenie toksyczne – wzrost stężenia substancji toksycznej w środowisku naturalnym (woda, powietrze, gleba) i wywołanie narażenia otoczenia na dany czynnik chemiczny.

Są to trzy najważniejsze czynniki, które można podzielić na mniejsze podgrupy, to jest zjawiska fizyczne, które mogą się utworzyć w specyficznych warunkach. Większość z nich została zestawiona w Tabeli 2.

Tabela 2.

Zestawienie głównych typów zagrożeń

Table 2.

Major types of hazards in the process industries

Rodzaj	Typ zagrożenia	Interpretacja	Zdarzenie szczytowe	Efekt fizyczny
Pożar	Pożar błyskawiczny (flash fire) FF	Deflagracyjne spalanie mieszaniny palnej bez wytworzenia niszczącej fali ciśnienia	Wyciek cieczy przegrzanej lub gazu skroplonego, powstanie chmury parowej i jej zapłon	Strumień promieniowania cieplnego oraz produkty toksyczne
	Pożar powierzchniowy (pool fire) PF	Spalanie par substancji ze swobodnej powierzchni cieczy	Wyciek lotnej cieczy palnej z aparatów, rurociągów	
	Pożar strumieniowy (jet fire) JF	Płomień w kształcie strumienia powstający u wylotu gazu wypływającego ze zbiornika ciśnieniowego przez mały otwór	Oslabienie wytrzymałości ścianki lub przekroczenie dopuszczalnego ciśnienia w zbiorniku	
	Pożar kulisty (fire ball) FB	Spalanie chmury palnej, tworząc kulistą przestrzeń płomienia	Powstanie chmury palnej wskutek pęknięcia zbiornika z gazem skroplonym i jej zapłon	

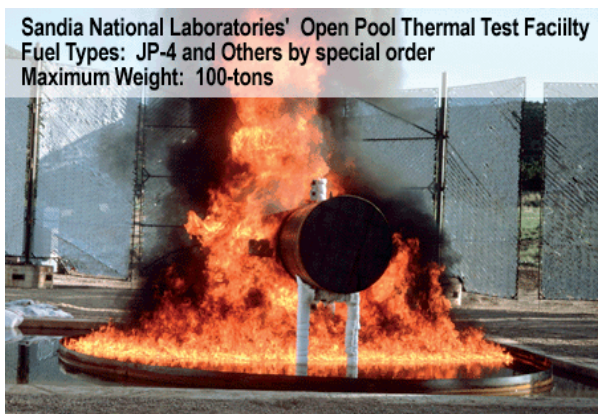
Rodzaj	Typ zagrożenia	Interpretacja	Zdarzenie szczytowe	Efekt fizyczny
Wybuch	W ograniczonej przestrzeni (vapour cloud explosion) VCE	Heterogeniczne, zwykle deflegacyjne spalanie mieszaniny palnej w ograniczonej przestrzeni	Wypływ gazu, gazu skroplonego lub przegrzanej cieczy ze zbiornika ciśnieniowego	Fala ciśnienia, promieniowanie cieplne
	W otwartej przestrzeni (unconfined vapour cloud explosion) UVCE	Heterogeniczne spalanie mieszaniny palnej z powstaniem fali ciśnienia lub fali uderzeniowej	Dyspersja oraz zapłon opóźniony	Fala ciśnienia, promieniowanie cieplne
	Ekspandującej pary z wrzącej cieczy (BLEVE)	Wybuchowe samoodparowanie cieczy palnej o temperaturze powyżej temperatury wrzenia	Zewnętrzny pożar typu pf lub jf, obejmujący swoim zasięgiem zbiornik z gazem skroplonym	Fala ciśnienia, promieniowanie cieplne, odłamki
	Wykipienie cieczy wrzącej ze zbiornika (boilover) BO	Gwałtowny wypływ cieczy o temperaturze powyżej temperatury wrzenia	Gwałtowne odparowanie cieczy znajdującej się wewnątrz cieczy właściwej w postaci emulsji	Promieniowanie cieplne
Wybuch	Wyrzut wrzącej cieczy ze zbiornika	Gwałtowny wyrzut wrzącej cieczy o temperaturze powyżej temperatury wrzenia	Gwałtowne odparowanie cieczy znajdującej się poniżej poziomu cieczy właściwej	Promieniowanie cieplne
	Pyłowy (dust explosion) DE	Gwałtowne spalanie (zwykle deflegacyjne) mieszaniny pyłowo-powietrznej	Zapłon mieszaniny pyłowej wewnątrz instalacji procesowej lub na zewnątrz po jej uwolnieniu	Fala ciśnienia, promieniowanie cieplne, odłamki
	Ciepłny (thermic explosion) TE	Gwałtowne wydzielenie się energii cieplnej ze wzrostem ciśnienia	Strata szczelności wskutek niekontrolowanego rozkładu cieplnego materiału	Fala ciśnienia, odłamki
	Fizyczny (physical explosion) PHE	Wzrost ciśnienia wewnątrz aparatu bez udziału reakcji chemicznej	Przekroczenie dopuszczalnego ciśnienia w urządzeniu	Fala ciśnienia, odłamki
	Boilover	Wykipienie zawartości zbiornika wskutek gwałtownego wrzenia	Zewnętrzny pożar lub reakcja chemiczna w zbiorniku	Fala ciśnienia
Skażenie toksyczne	Ciągłe (toxic release Continuous) TRC	Ciągły wypływ toksycznego gazu lub cieczy	Utrata szczelności zbiornika lub rurociągu	Wzrost stężenia substancji w środowisku (skażenie)
	Chwilowe (toxic release instantaneous) TRI	Chwilowy wypływ dużej ilości toksycznego gazu lub cieczy	Utrata szczelności zbiornika lub rurociągu, wypływ w krótkim czasie	

Pożar powierzchniowy (pool fire) powstaje w wyniku uwolnienia się substancji palnej i utworzenia rozlewiska na powierzchni podłoża. Wystąpienie zapłonu powoduje powstanie pożaru pary cieczy nad jej powierzchnią, który jest podtrzymywany głównie przez stały dopływ par palnych, powstających w wyniku dostarczanego ciepła od płomieni do powierzchni cieczy. Pożar powierzchniowy może prowadzić do pożarów zbiorników lub w skrajnym przypadku do pożaru BLEVE. Głównym efektem fizycznym tego zagrożenia jest promieniowanie cieplne oraz produkty spalania, które w niektórych przypadkach mogą być toksyczne.

Dla obliczeń skutków pożarów powierzchniowych najistotniejszym zagadnieniem jest określenie zależności promieniowania cieplnego od odległości. Ze względu

na sferyczny kształt rozprzestrzeniania się promieniowania cieplnego, odległość tę określa się, jako promień sfery, na którym może występować dany rodzaj skutków, np. 100% ofiar śmiertelnych wśród całej narażonej na oddziaływanie populacji. Im bliżej powierzchni czoła płomienia nad rozlewiskiem, tym skutki są poważniejsze. Podczas określania skutków należy uwzględnić wartości progowe wpływu strumienia promieniowania cieplnego na obiekty, człowieka oraz określić wymagane prawem bezpieczne odległości. Bezpieczna odległość jest to minimalna odległość zapewniająca takie oddziaływanie skutków awarii, które nie spowodują nieodwracalnych skutków zdrowotnych, a także strat majątkowych i środowiskowych. Zagadnienie to jest szczególnie ważne ze względu na lokalizację poszczególnych instalacji w zakładach oraz

przy planowaniu przestrzennym, z uwagi na możliwość występowania efektu domino i przenoszenia się zagrożeń na inne instalacje. Poniżej na fotografii 1. przedstawiono pożar powierzchniowy.



Fot. 1. Pożar powierzchniowy. [14]
Pict. 1. Example of pool fire. [14]

Pożar błyskawiczny (flash fire), powstaje przy zapłonie mieszaniny chmury palnego gazu i tlenu. Kształt płomienia zależy od miejsca zapłonu i przybiera postać chmury przed jej zapłonem. Ogólnie można powiedzieć, że ten rodzaj pożaru występuje wtedy, gdy palne pary i lub gaz nie do końca wymieszają się dokładnie z utleniaczem. Powoduje to sytuację, w której siły generowane w wyniku spalania powodują turbulencje, które dodatkowo wspomagają spalanie, bez gwałtownego wzrostu ciśnienia. Pożar ten może być skutkiem utworzenia rozlewiska, jego parowania, dyspersji do środowiska i następnie zapłonu opóźnionego przemieszczającej się chmury. W specyficznych warunkach może prowadzić do wybuchu przestrzennego (UVCE lub VCE).

Ocena zagrożeń związanych z pożarem błyskawicznym połączona jest z określeniem dyspersji mieszaniny i następnie jej zapłonem. Zazwyczaj zakłada się, że na brzegu konturu mieszaniny panuje stężenie gazu palnego równe, co najmniej dolnej granicy wybuchowości. Osoby znajdujące się wewnątrz chmury ponoszą skutki śmiertelne, natomiast osoby na zewnątrz chmury narażone są na określony poziom promieniowania cieplnego w zależności od odległości.

Wyjaśniając bardziej szczegółowo mechanizm pożaru błyskawicznego można się odnieść do bardziej szczegółowego modelu. Wystąpienie zapłonu na krawędzi chmury powoduje pożar błyskawiczny i spalanie zachodzi w wąskiej warstwie, gdzie powietrze może dyfundować do obłoku i obniżyć stężenie paliwa poniżej górnej granicy wybuchowości. Proces spalania jest kontrolowany przez zdolność migracji powietrza do obszaru spalania. Ponieważ grubość warstwy płomienia nie jest zbyt duża, to i ilość energii wypromieniowanej jest mała, a strefa zagrożenia zwykle posiada te same wymiary jak wymiary obłoku parowego. Na fotografii 2 przedstawiono przykład pożaru błyskawicznego.



Fot. 2. Pożar błyskawiczny. [15]
Pict. 2. An example of flash fire. [15]

Pożar strumieniowy (jet fire) powstaje, gdy uwalniająca się z rurociągu lub zbiornika ciecz lub gaz palny ulegnie zapłonowi. Zwykle wypływ ten zachodzi z małego otworu, a substancja znajduje się pod ciśnieniem. Powstaje wtedy długi ciągły płomień, który w przypadku małej prędkości wypływu substancji powstaje blisko punktu wypływu, a przy dużych prędkościach następuje oderwanie płomienia i jego stabilizacja w pewnym oddaleniu od źródła wypływu. Strumień substancji, opuszczający rurociąg lub zbiornik w wyniku ich rozszczelnienia, porywa duże ilości powietrza, wskutek czego paliwo to spala się z utworzeniem bardzo jasnych płomieni, oraz wydzielają się niewielkie ilości dymu. Przy modelowaniu tego zjawiska trudno jest oszacować rozmiary płomienia, ponieważ powstaje zjawisko oderwania się płomienia od źródła, a dodatkowym czynnikiem, który ma tutaj wpływ jest prędkość i kierunek wiatru. Z uwagi na powyższe trudności, analiza pożarów strumieniowych pomija wpływ tych parametrów i opisuje pożar strumieniowy w postaci widzialnego płomienia w warunkach idealnych, w nieruchomym powietrzu. Pożar strumieniowy może inicjować inne poważne zagrożenia np. wybuch BLEVE. Na fotografii 3. przedstawiono pożar strumieniowy.



Fot. 3. Pożar strumieniowy. [16]
Pict. 3. An example of jet fire. [16]

Pożar kulisty (fire ball) powstaje wskutek gwałtownego uwolnienia dużej ilości palnego gazu lub par i objawia się w postaci kuli ognistej. Początkowo przed zapłonem chmura przybiera postać półkuli, a po zapłonie szybko się zmienia w kulę ognistą, w wyniku oddzia-

ływania ciepłych sił wyporu mieszaniny. Jeśli wypływ skierowany jest do góry, to kula ognista tworzy się natychmiast po zapłonie chmury. Pożar kulisty stanowi najczęściej drugi etap wybuchu BLEVE. W literaturze przedmiotu dość często błędnie w sposób równorzędny rozpatruje się pożar kulisty oraz zjawisko BLEVE. Przy modelowaniu skutków awarii przemysłowych, należy rozpatrywać te dwa zjawiska odrębnie, jeśli chce się uzyskać wyniki zbliżone do rzeczywistych. Na fotografii 4. przedstawiono pożar kulisty.



Fot. 4. Pożar kulisty. [17]
Pict. 4. An example of fire ball [17]

BLEVE (boiling liquid expanding vapor explosion) skrót ten jest akronimem wybuchu ekspandującej pary wrzącej cieczy. Zjawisko to może wystąpić podczas ogrzania zbiornika z substancją niebezpieczną (najczęściej skroplonym gazem) w wyniku pożaru zewnętrznego, co może być przyczyną pęknięcia ścianki zbiornika, a w konsekwencji spowodować gwałtowny wyciek zawartości zbiornika i jego rozerwanie, czyli tzw. wybuch BLEVE czyli zjawisko fizyczne. W konsekwencji czego mogą powstać następujące efekty fizyczne:

- promieniowanie ciepłe;
- fala nadciśnienia;
- odłamkowanie.

O ile pierwsze dwa zagrożenia rozchodzą się sferycznie od źródła to odłamkowanie może być niesymetryczne i rozprzestrzeniać się z różnymi prędkościami. Na fotografii 5. przedstawiono wybuch BLEVE w momencie rozerwania zbiornika ze skroplonym propanem.

W przypadku, gdy chmura paliwa o kształcie kuli jest ograniczona ze wszystkich stron przez powietrze, spalanie chmury przebiega trzyetapowo:

- zapalenie się na granicach chmury,
- rozcieńczenie chmury przez powietrze,
- rozprzestrzenianie się płomienia w chmurze.

Tworząca się w pierwszym okresie po awarii chmura pary tworzy z powietrzem mieszaninę bogatą (stężenie składnika palnego jest bardzo duże). Granice palności

par cieczy generujących zjawisko Fireball są bardzo wąskie (dla większości substancji 1,5 - 9,0 % obj.). Stąd też po odparowaniu, stężenie składnika palnego w mieszaninie jest wyższe od 10 % obj. i paliwo nie spala się. Skład ilościowy mieszaniny palnej w kształcie kuli nie jest stały, lecz jest funkcją czasu i odległości od miejsca wycieku. Na granicach chmury, gdzie styka się ona z powietrzem, dyfundujące do niej powietrze rozcieńcza mieszaninę do stężeń określonych zakresem palności składnika palnego. Jeśli ulegnie ona zapaleniu w tej części chmury, spala się dając produkty spalania. Gorące produkty spalania różnią się gęstością od niezapalanej mieszaniny z powodu różnicy w ich nagrzewaniu. Powstałe w ten sposób siły wyporu powodują pionowe przyśpieszenie palącej się chmury i coraz szybsze wciąganie do niej powietrza. W ten sposób zaczyna się spalać coraz większa objętość chmury. Proces ten zapewnia ciągłość spalania chmury (im więcej powietrza wpływa do chmury, tym więcej spala się paliwa). Jeśli stężenie powietrza wciąganego do chmury będzie wystarczające do całkowitego spalania chmury, płomień rozprzestrzeni się na całą objętość chmury, powodując jej całkowite spalanie. W zjawisku *BLEVE-Fireball* praktyczne znaczenie ma przede wszystkim:

- wysokość tworzącego się płomienia,
- czas całkowitego spalania,
- maksymalna średnica powstałego pożaru.



Fot. 5. Wybuch BLEVE. [18]
Pict. 5. An example of BLEVE [18]

Czynniki te decydują o całkowitej mocy strumienia ciepła generowanego podczas *Fireball*. Tabela 3 przedstawia oddziaływanie strumieni ciepłych na ratowników w wyniku przejścia wybuchu BLEVE w kulę ognistą podczas wycieku LPG.

Kolejne zagrożenie to promieniowanie ciepłe, które jest związane z wybuchem chemicznym (lub pożarem, jako następstwem wybuchu). W Tabeli 4 przedstawiono dane umożliwiające porównanie intensywności promieniowania ciepłego od wybuchu typu BLEVE i różnego rodzaju pożarów węglowodorów.

Tabela 3.

Oddziaływanie strumieni ciepłych na ratowników [12]

Table 3.

Effects of heat fluxes on rescuers [12]

Masa uwolnionego LPG z cysterny (mass of LPG released from the tank) [kg]	Charakterystyka powstajej kuli ogniowej (characteristics of the resulting of fireball)	Strumień ciepła [kW/m ²] w funkcji odległość od środka kuli ogniowej (thermal radiation as a function of distance from the center of the fireball) [m]		Skutki oddziaływania strumienia ciepła (oparzenia) (Effects of heat flux (burns))
7 000	Wysokość fireball – 48,2 m Średnica – 96,4 m Czas spalania – 13,5 s Gęstość promieniowania cieplnego powierzchni płomienia – 450 kW/m ²	49,0 27,4 9,6 1,4	130,2 165,4 235,7 423,2	Oparzenia III stopnia Oparzenia II stopnia Oparzenia I stopnia Próg bólu
10 000	Wysokość fireball – 54,2 m Średnica – 108,3 m Czas spalania – 14,9 s Gęstość promieniowania cieplnego powierzchni płomienia – 450 kW/m ²	49,0 27,4 9,6 1,4	144,0 185,0 265,1 468,2	Oparzenia III stopnia Oparzenia II stopnia Oparzenia I stopnia Próg bólu
22 000	Wysokość fireball – 70,1 m Średnica – 140,2 m Czas spalania – 19,3 s Gęstość promieniowania cieplnego powierzchni płomienia – 450 kW/m ²	49,0 27,4 9,6 1,4	187,3 238,1 339,6 593,5	Oparzenia III stopnia Oparzenia II stopnia Oparzenia I stopnia Próg bólu

Jak widać, jedynie pożar strumieniowy ciekłych paliw węglowodorowych przewyższa wybuch typu BLEVE pod względem natężenia generowanego promieniowania cieplnego. Przy ocenie obrażeń ciała, jakie powoduje u ludzi intensywne promieniowanie ciepłe przyjmuje się dwie wartości czasu narażenia, a mianowicie:

- 10 sekund - przy założeniu, że w tym czasie osoba narażona znajdzie schronienie,
- 30 sekund - zakładając przypadek braku środków ochrony lub braku możliwości ucieczki.

Przy czasach ekspozycji w granicach 10 s, ból nie do wytrzymania pojawia się przy strumieniach ciepła rzędu 7 kW/m², zaś przy czasach ekspozycji w granicach 30 s – przy strumieniach ciepła rzędu 3 kW/m². Przykładowe dane charakteryzujące oddziaływanie intensywnego promieniowania cieplnego na ludzi przedstawiono w tabeli 5.

Skutki wynikające z oddziaływania fali nadciśnienia po wybuchu na ludzi i konstrukcje budowlane przedstawione zostały w tabeli 6 i 7 [13].

Tabela 4.

Średnie intensywności promieniowania dla różnych typów pożarów gazów i cieczy [12]

Table 4.

Mean intensity of heat radiation for different fires involving gases and flammable liquids [12]

Rodzaj pożaru (type of fire)	Natężenie promieniowania cieplnego (the intensity of thermal radiation) [kW/m ²]	Temperatura płomienia (temperature of the flame) [K]
BLEVE (wszystkie ciecze palne)	250	1500
Požary strumieniowe LPG/benzyna/nafta LNG/etanol	350 200	1600 1600
Požary powierzchniowe LNG LPG Benzyna/nafta etanol	200 100 75 150	1600 1600 1300 1550

Tabela 5.

Oddziaływanie promieniowania ciepłego na ludzi [12]

Table 5.

Effects of heat radiation on humans [12]

Strumień ciepły (thermal radiation) [kW/m²]	Rodzaj obrażeń (type of injury)
35	100 % ofiar śmiertelnych w ciągu 1 min; 1 % ofiar śmiertelnych w ciągu 1s
23	100 % ofiar śmiertelnych w ciągu 1 min; znaczne urazy w ciągu 10 s
12,6	1 % ofiar śmiertelnych w ciągu 1 min; I stopień oparzenia w ciągu 10 s
4,7	Powoduje ból przy czasie narażenia dłuższym niż 20 s; uszkodzenia ciała możliwe przy czasie narażenia dłuższym niż 30 s
2,1	Wartość progowa dla wywołania bólu przy czasie narażenia dłuższym niż 1 min
1,2	Przy długich czasach narażenia nie stwarza dyskomfortu

Tabela 6.

Wpływ wartości nadciśnienia powstałego w skutekwybuchu na wielkość i typ zniszczeń elementów konstrukcyjnych i instalacji [13]

Table 6.

Influence of explosion overpressure on types and sizes of damages in constructionsand elements [13]

Nadciśnienie (overpressure) [kPa]	Skutki (effects)
0,14	Dokuczliwy hałas, szum (137 dB)
0,21	Pęknięcie dużych szyb okiennych (szkło zwykłe)
0,30	Głośny huk (143 dB)
0,70	Rozrywanie ram okiennych
2,7	Wartość bezpieczna dla budynku
2,8	Ograniczone uszkodzenia konstrukcji
4,8	Uszkodzenia konstrukcji budynku
6,9	Częściowe zburzenie budynków bez możliwości ich odbudowania
6,9 - 13,8	Zniszczenie płyt gipsowo-kartonowych, elementów stalowych i aluminiowych, uszkodzenie mocowań i posadowień elementów konstrukcyjnych
9,0	Lekkie odkształcenia ramowej konstrukcji budynku wykonanej ze stali
13,8	Częściowe zawalenie się ścian i dachów budynków
13,8 – 20,7	Rozpadanie się nie wzmocnionych ścian betonowych
15,8	Dolna granica nadciśnień poważnych uszkodzeń konstrukcji budowlanych
17,2	Zburzenie 50% domów murowanych
20,7	Niewielkie uszkodzenia ciężkich maszyn i urządzeń (o masie do 1500 kg), zniekształcenie i wyrwanie z posadowienia (fundamentu) ramowych konstrukcji stalowych
34,5 – 48,0	Prawie całkowite zniszczenie budynków
48,0	Wywrócenie załadowanych wagonów towarowych
48,0 – 55,1	Zniszczenie ścian murowanych o grubości mniejszej lub równej 0,3 m, wykonanych z cegły pełnej, zniszczenia zbiorników magazynowych powodujących masowe wypływy substancji, granica wystąpienia efektu domino – tj oddziaływania destrukcyjnego RZA na sąsiednią instalację/obiekt
62,1	Całkowite zniszczenie załadowanych, krytych wagonów towarowych
68,9	Całkowite zniszczenie budynków, przesunięcie i poważne uszkodzenia ciężkich maszyn i urządzeń (o masie do 3500 kg)

Wybuch w przestrzeni nieograniczonej UVCE (Unconfined Vapour Cloud Explosion) występuje wtedy, gdy substancja palna (gaz lub ciecz o wysokiej prężności par) wypływa na zewnątrz zbiornika i miesza się z powie-

niż w przypadku UVCE, co przekłada się na duże zniszczenia w konstrukcji obiektu, wewnątrz którego wybuch ma miejsce. Ponadto można się tu spodziewać generowania sporej ilości odłamków analogicznie, jak w przypadku

Wpływ wartości nadciśnienia powstałego wskutek wybuchu na wielkość obrażeń u ludzi [13]

Tabela 7.

Influence of explosion overpressure on humans [13]

Table 7.

Nadciśnienie (overpressure) [kPa]	Skutki (effects)
100 – 133	50% zniszczenia błony bębenkowej ucha (poniżej 20 roku życia)
200 – 233	50% zniszczenia błony bębenkowej ucha (powyżej 20 roku życia)
133 – 200	Znaczne uszkodzenia płuc
200 – 300	Graniczna wartość wystąpienia ofiar śmiertelnych
350 – 500	50% ofiar śmiertelnych
500 – 800	100% ofiar śmiertelnych

trzem do czasu utworzenia się mieszaniny palnej, której średnie stężenie substancji jest wyższe niż dolna granica wybuchowości. Charakterystyczną cechą wybuchu jest utworzenie się fali nadciśnienia, stanowiącej jedyny mechanizm przekazywania energii otoczeniu w miejsca wybuchu chmury gazowej. Zjawisko to posiada duży potencjał powodowania zniszczeń w otwartej przestrzeni zajmującej duży obszar. Intensywność wybuchu zależy głównie od ilości substancji biorącej udział w reakcji oraz mocy źródła zapłonu. Na fotografii 6 przedstawiono wybuch UVCE.

wybuchu fizycznego BLEVE. Na fotografii 7. przedstawiono wybuch VCE.



Fot. 6. Wybuch UVCE. [21]
Pict. 6. An example of UVCE [21]



Fot. 7. Wybuch VCE. [22]
Pict. 7. An example of VCE [22]

Wybuch w ograniczonej przestrzeni VCE (Vapour Cloud Explosion) jest to wybuch chmury palnych par lub gazu z powietrzem, w której średnie stężenie substancji palnej jest wyższe niż dolna granica wybuchowości. Różnica w porównaniu z UVCE polega na tym, że wybuch ten przebiega w ograniczonej przestrzeni np. we wnętrzach aparatów przemysłowych budynków. Oddziaływanie tego wybuchu generuje znacznie większe wartości nadciśnień

Wybuch BOILOVER (wyrzut - cieczy wrzącej ze zbiornika) następuje wtedy, gdy stopniowo zwiększa się objętość cieczy i w konsekwencji przeleje się ona przez krawędź zbiornika magazynowego. Zjawisko wykipienia jest prawdopodobne w przypadku cieczy palnej o wysokiej lepkości, zawierającej nierozpuszczone substancje o niskiej temperaturze wrzenia. W przypadku magazynowanej ropy naftowej substancją tą jest woda, której zawartość związana jest z procesem wydobywania ropy oraz dostarczaniem wody na skutek działań gaśniczych. W początkowym okresie spalania, woda mniej lub bardziej równomiernie rozłożona jest w objętości zbiornika z ropą naftową. W wyniku zmniejszenia lepkości górnej warstwy ropy na skutek ogrzewania i odparowywania lżejszych frakcji ropy, zawieszane krople wody stopniowo opadają ku dołowi, zatrzymując się w głębszych

warstwach cieczy o stosunkowo dużej lepkości (o niższej temperaturze). Jednocześnie woda nagrzewa się i gdy osiągnie temperaturę wrzenia odparowuje. Wytworzona para wodna przepływa do góry zbiornika powoduje spienienie ropy, która paląc się intensywnie przelewa się przez krawędź zbiornika. Na Fotografii 8 pokazano wykipienie ropy naftowej ze zbiornika magazynowego.



Fot. 8. Wykypienie ropy naftowej. [23]
Pict. 8. An example of BOILOVER. [23]

Wyrzut ropy naftowej może nastąpić wtedy, gdy podczas spalania ropy w zbiorniku, na którego dnie zalega warstwa wody. Temperatura powierzchni ropy w trakcie pożaru jest równa temperaturze wrzenia. Pod powierzchnią ropy, w wyniku oddziaływania ciepła rozdestylowania ropy tworzą się 2 warstwy; górna i dolna. Po pewnym czasie pożaru temperatura górnej warstwy ropy przewyższa jej temperaturę wrzenia, grubość tej warstwy zwiększa się w czasie trwania pożaru. W drugiej dolnej warstwie temperatura szybko maleje w głąb od powierzchni rozdziału z powodu wchodzenia jej w ochłodzone warstwy znajdujące się bliżej dna zbiornika. Charakter takiego zjawiska spowodowany jest silnymi prądami konwekcyjnymi tworzącymi się w objętości cieczy wypełniającej zbiornik magazynowy. W trakcie procesu spalania ropa składająca się z różnych frakcji węglowodorów rozdestylowuje się na frakcje lekkie i ciężkie. Te drugie charakteryzują się większą gęstością od gęstości, jaką posiadały przed pożarem. W wyniku tego przesuwają się one ku dół zbiornika, a na jej miejsce napływa nieoddestylowana ropa. W momencie, gdy warstwa przegrzana ropy o temperaturze rzędu 300-350°C dotrze do dna zbiornika, gdzie znajduje się woda następuje gwałtowne jej odparowanie. Wskutek zwiększenia objętości wody około 1700 razy i gwałtownego jej przemieszczenia ku górze zbiornika następuje wyrzut ropy ze zbiornika, która wraz z parą wodną wydostaje się poza zbiornik. Z powodu znacznych sił wygenerowanych przy wyrzucie pary wodnej, tego typu awarie charakteryzują się dużym zasięgiem generowanych skutków (głównie rozlewiska płonącej cieczy). Na fotografii 9. pokazano zbiornik z ropą naftową przed wyrzutem ropy naftowej.



Fot. 9. Wyrzut ropy naftowej. [24]
Pict. 9. BOILOVER of crude oil. [24]

Zjawisko wybuchów mieszanin pyłowo-powietrznych jest bardzo podobne do wybuchu gazów, czy par cieczy palnych, jednakże mimo wszystko istnieje kilka znaczących różnic pomiędzy nimi. Wybuch pyłu może pojawić się w momencie, gdy powstaje mieszanina pyłowo-powietrzna. Wówczas następuje uwolnienie dużej ilości ciepła spalania oraz gwałtowny wzrost ciśnienia (zazwyczaj na poziomie 0,5-1,2 MPa). Wybuch mieszaniny pyłowo-powietrznej zależy zatem będzie w głównej mierze od:

- dopływu tlenu do procesu spalania,
- własności pyłu (rozdrobnienie, wilgotność, części lotne, stężenie, itp.),
- składu i stanu mieszaniny wybuchowej,
- rodzaju przestrzeni wybuchu,
- cech inicjatora (energia, czas działania, temperatura, itp.).

Proces wybuchu mieszaniny pyłowo-powietrznej składać się zatem będzie w uproszczeniu z następujących procesów [25]:

- transportu ciepła do powierzchni cząstki, przejmowania go przez cząstkę i jej nagrzewania,
- rozkład termiczny powierzchni cząstki z dalszym jej nagrzewaniem oraz wydzielanie części lotnych,
- mieszania się wydzielonych części lotnych z powietrzem wytwarzającego mieszaninę palną i jej zapaleniu,
- transportu ciepła od płomienia do sąsiednich cząstek oraz ich utlenianie i zapłon.

Jedynie w niektórych, czy też tylko poszczególnych przypadkach, takich jak młyny strumieniowe, wybuchowa mieszanina pyłowo-powietrzna może powstać na etapie procesu technologicznego. W większości przypadków wybuchowe mieszaniny pyłowo-powietrzne powstają na skutek uniesienia lub dyspersji pyłu nagromadzonego w warstwach. Proces nagromadzenia pyłu może zarówno stanowić cel zamierzony lub wymagany do celów przemysłowych, jak na przykład w silosach, koszach samowyladowczych, czy w filtrach workowych,

jak również być efektem ubocznym (niezamierzonym), przykładowo osadzanie się pyłu na zewnętrznych powierzchniach urządzeń procesowych, lub na ścianach i podłogach pomieszczeń magazynowych. Rozproszony pył może wytworzyć mieszaninę pyłowo-powietrzną o stężeniu zawartym pomiędzy dolną i górną granicą wybuchowości jedynie przez krótki czas.

Literatura

1. Lees F. P., *Loss Prevention in Process Industries*, Butterworths, 1980 r.;
2. Bagster D.F., Pitblado, R.M., *The Estimation of Domino Incident Frequencies – An Approach*, Trans I ChemE, Vol. 69, Part B, 1991 r.;
3. Health and Safety Commission, *The Control of Major Hazards*, Third Report of the HSC Advisory Committee on Major Hazards, HMSO, 1984 r.;
4. <http://www.atest.com.pl/pictures/2002/ed0211b.jpg> (17/08/2010);
5. <http://mahb.jrc.ec.europa.eu/>;
6. <http://www.atsdr.cdc.gov/>;
7. <http://www.factsonline.nl/>;
8. Chung P. W. H., Jefferson M., *A Fuzzy Approach to Accessing Accident Databases*, September 1998.;
9. <http://www.hse.gov.uk/>;
10. Clini, R. M., Darbra and J. Casal, *Historical Analysis of Accidents Involving Domino Effect F*;
11. Kourniotis S.P., Kiranoudis C.T., Markatos N.C., 2000, *Statistical analysis of domino chemical accidents*, Journal of Hazardous Materials 71 239–252;
12. Praca zbiorowa pod redakcją Adama S. Markowskiego, *Zapobieganie stratom w przemyśle. Część III – Zarządzanie bezpieczeństwem procesowym*, Politechnika Łódzka, 2000;
13. *CPR 16E – Methods for determination of possible damage*, TNO, Holandia 1989;
14. <http://www.sandia.gov/tp/images/pool.gif> (17/08/2011);
15. <http://darksideofrom.com/wp-content/uploads/2008/03/caddyshack02.jpg> (12/08/2011);
16. <http://www.thermdyne.com/> (11/11/2011);
17. <http://t2.gstatic.com/images?q=tbn:fd4uE-vlvosAIgM>:http://http://www.ctv.ca/servlet/ImageShrinker?http://images.ctv.ca/archives/CTV-News/img2/20100804/600_mynews_propane_100804.jpg,160,81&t=1 (12/11/2011);
18. http://2.bp.blogspot.com/_IzZ9zHM6YVU/SRbG-GICFR2I/AAAAAAAAAE14/U5ABWU0NWL0/s400/BLEVE (15/09/2011);
19. http://www.enotes.com/w/images/d/d5/Bleve_explosion.png (15/09/2010);
20. <http://www.safetycasemanagement.ltd.uk> (21/08/2011);
21. http://www.bizkaia.org/Home2/Archivos/DPTO7/Temas/Fotos/fuego_diapositiva17.jpg (11/07/2009);
22. [\[mV9a1M:http://www.lboro.ac.uk/departments/cg/news/graphics/VapourCloudExplosion.jpg&t=1\]\(http://www.lboro.ac.uk/departments/cg/news/graphics/VapourCloudExplosion.jpg&t=1\) \(10/09/2011\);](http://t3.gstatic.com/images?q=tbn:rMKHaOkj-

</div>
<div data-bbox=)

23. http://www.gezamenlijke-brandweer.nl/media/images/fotos/boilover-1_large.jpg (13/08/2011);
24. <http://www.cbc.ca/gfx/images/news/photos/2007/11/29/enbridge-fire-cp-3965937.jpg> (15/08/2009);
25. Teodorczyk A., *Podstawy modelowania matematycznego wybuchu mieszaniny pyłowo-gazowej*, III Międzynarodowa Szkoła Wybuchowości Pyłów Przemysłowych, 1987;

st. kpt. inż. Piotr Lesiak

w 2002 r. ukończył studia w Szkole Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie. W 2010 r. uzyskał dyplom inż. chemii w Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie. Obecnie pełni służbę w Centrum Naukowo-Badawczym Ochrony Przeciwożarowej Państwowym Instytucie Badawczym w Józefowie w Zespole Laboratoriów Procesów Spalania i Wybuchowości. Oficer PSP.

st. kpt. mgr inż. Rafał Porowski

w 2002r. ukończył studia w Szkole Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie. W 2010 roku ukończył studia podyplomowe w University of Ulster w Irlandii Północnej w kierunku inżynierii bezpieczeństwa wodorowego. W roku 2011 ukończył studia doktoranckie na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. W latach 2010-2011 stypendysta Fulbrighta w California Institute of Technology w Explosion Dynamics Laboratory (USA). Pełni funkcję kierownika Zespołu Laboratoriów Procesów Spalania i Wybuchowości w Centrum Naukowo-Badawczym Ochrony Przeciwożarowej PIB w Józefowie.

Recenzenci
dr Grzegorz Łyjak
dr Tomasz Węsierski