

Red. T. Łodygowski, A. Garstecki

Bezpieczeństwo budowli w warunkach zagrożenia terrorystycznego



Wydawnictwo
Politechniki Poznańskiej 2012

Recenzent
prof. dr hab. inż. WIESŁAW BUCZKOWSKI

Poszczególne rozdziały opracowali:

ADAM GLEMA – rozdział 1

ADAM NADOLNY – rozdział 2

LEOPOLD KRUSZKA – rozdział 3

WOJCIECH SUMELKA, KRZYSZTOF SZAJEK, MARCIN WIERSZYCKI – rozdział 4

ŁUKASZ FAŚCISZEWSKI, TOMASZ GAJEWSKI, TOMASZ GARBOWSKI, PIOTR SIELICKI – rozdział 5

TOMASZ JANKOWIAK – rozdział 6

TOMASZ GARBOWSKI, PIOTR SIELICKI – rozdział 7

Redaktor
RENATA LUBAWY

Projekt okładki

Opracowanie komputerowe
TOMASZ GAJEWSKI

W książce opisano wyniki badań wykonanych w ramach zamawianego projektu rozwojowego Nr OR00 009712, realizowanego przez Politechnikę Poznańską, Wojskową Akademię Techniczną w Warszawie oraz przedsiębiorstwo ROMA Sp. z o.o.

Utwór w całości ani we fragmentach nie może być powielany ani rozpowszechniany za pomocą urządzeń elektronicznych, mechanicznych, kopiujących, nagrywających i innych bez pisemnej zgody posiadacza praw autorskich

ISBN 978-83-7775-208-1

Wydanie I

© Copyright by Politechnika Poznańska, Poznań 2013

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI POZNAŃSKIEJ

60-965 Poznań, pl. M. Skłodowskiej-Curie 2

tel. 61 6653516, faks 61 6653583

e-mail: office_ed@put.poznan.pl, www.ed.put.poznan.pl

Sprzedaż publikacji:

Poznańska Księgarnia Akademicka

61-138 Poznań, ul. Piotrowo 3

tel. 61 6652324; faks 61 6652326

e-mail: politechnik@politechnik.poznan.pl, www.politechnik.poznan.pl

Druk i oprawa: Perfekt Druk

ul. Świerzawska 1 60-321 Poznań

tel. 61 8611181-83

Spis treści

Przedmowa.....	7
1. Zagadnienia bezpieczeństwa obiektu budowlanego.....	11
1.1. Analiza ryzyka – identyfikowanie i ocena zagrożeń	11
1.1.1. Bezpieczeństwo i ochrona	11
1.1.2. Zagrożenia wybuchem.....	17
1.2. Środki ochrony – zapewnienie bezpieczeństwa.....	20
1.2.1. Ochrona obiektów infrastruktury przed zagrożeniami.....	20
1.2.2. Obiekty chronione	21
1.2.3. Opracowanie systemu ochrony.....	22
1.3. Ramowa procedura badania stanu bezpieczeństwa obiektu oraz określania środków ochrony osób i mienia.....	25
1.3.1. Etap I. Analiza i ocena warunków powstawania potencjalnych zagrożeń przestępnych w obiekcie	25
1.3.2. Etap II. Analiza i ocena okoliczności sprzyjających powstawaniu zagrożeń przestępnych.....	27
1.3.3. Etap III. Analiza i ocena środków ochrony koniecznych do neutralizacji zagrożeń przestępnych.....	28
1.4. Inne zagadnienia związane z bezpieczeństwem obiektu.....	29
1.4.1. Zarządzanie ryzykiem w przedsiębiorstwie.....	29
1.4.2. Zarządzanie energią.....	29
1.4.3. Zintegrowane zarządzanie bezpieczeństwem obiektu	30
1.4.4. Monitoring strukturalny.....	30
1.4.5. Audyt bezpieczeństwa przedsiębiorstwa	31
1.4.6. Stan kryzysu	31
Literatura	35
2. Rozwiązania urbanistyczne i architektoniczne a zagrożenie terrorystyczne.....	37
2.1. Wprowadzenie.....	37
2.2. Układy urbanistyczne i elementy architektury zewnętrznej utrudniające dostęp terrorystom	39
2.3. Potrzeba uwzględniania zagrożenia już na etapie tworzenia koncepcji architektonicznej obiektu.....	42
2.4. Podstawowe zasady projektowania nowych obiektów	49
2.5. Możliwości zwiększenia bezpieczeństwa istniejących obiektów za pomocą zabiegów architektonicznych.....	58
Literatura	61

3. Analiza zagrożeń terrorystycznych centralnych obiektów infrastruktury krytycznej	63
3.1. Wprowadzenie	63
3.2. Analiza bezpieczeństwa dozorowanych kompleksów centralnych obiektów infrastruktury krytycznej	65
3.3. Analiza standardów antyterrorystycznych w odniesieniu do centralnych obiektów infrastruktury krytycznej	71
3.4. Koncepcja konstrukcji ochronnej centralnych obiektów infrastruktury krytycznej	74
Literatura	75
4. Stan przepisów normowych i przegląd wytycznych do projektowania	77
4.1. Wstęp	77
4.2. Dostępne amerykańskie normy i instrukcje	79
4.3. Norma amerykańska TM 5-1300/UFC 3-340-002	82
4.4. Stan przepisów normowych i rozporządzeń w Polsce	83
Literatura	85
5. Ciśnienie powstające w wyniku eksplozji oraz jego rozkład w czasie i przestrzeni	87
5.1. Przebieg eksplozji	87
5.2. Ocena rozkładu ciśnień w wyniku eksplozji	89
5.2.1. Klasyfikacja materiałów wybuchowych	89
5.2.2. Klasyfikacje fali uderzeniowej	89
5.3. Rozkład obciążeń na przegrodzie	94
5.3.1. Skutek fali uderzeniowej	94
5.3.2. Wpływ odbicia fali	98
5.3.3. Odbicie fali uderzeniowej od przegrody	101
5.4. Ewolucja ciśnień w zamkniętym pomieszczeniu	103
5.5. Propozycja uproszczonego, empirycznego wyznaczania rozkładu ciśnienia	109
5.5.1. Metody oceny właściwości fali uderzeniowej	109
5.5.2. Parametry obciążenia wybuchem – metoda empiryczna	110
5.5.3. Parametry obciążenia wybuchem – metoda numeryczna	113
5.6. Ocena bezpieczeństwa personelu i konstrukcji w różnych strefach budynku	116
5.6.1. Zniszczenie budynku	116
5.6.2. Bezpieczeństwo ludzi	117
5.6.3. Poziom zabezpieczeń	118
5.6.4. Strefa rażenia	121
5.6.5. Uproszczone kryteria oceny wybuchu i jego skutków	124
Literatura	125
6. Prawa konstytutywne materiałów stosowanych w budownictwie	127
6.1. Beton	127
6.2. Stal	140
Literatura	142
7. Przykłady komputerowej analizy procesu zniszczenia elementów konstrukcyjnych	145
7.1. Uwagi wstępne	145
7.2. Ocena wytrzymałości słupów żelbetowych, stalowych i zespolonych	147

7.3. Ocena bezpieczeństwa wewnątrz wielokondygnacyjnego budynku biurowego	159
7.4. Analiza propagacji ciśnienia w kondygnacji budynku podziemnego. Wyzna- czenie stref bezpieczeństwa	162
7.5. Wzmocniona ściana murowana	164
7.6. Podsumowanie	166
Literatura	169
Posłowie	171

Przedmowa

W aktualnej sytuacji społeczno-politycznej istnieje realne zagrożenie różnego rodzaju działaniami terrorystycznymi, w tym niestety również z użyciem materiałów wybuchowych.

Niniejsze wydawnictwo adresowane jest do osób, które z racji swej pracy zawodowej są zobowiązane do szczególnej dbałości o bezpieczeństwo ludzi i obiektów budowlanych w sytuacjach zagrożenia terrorystycznego. Mamy tu na myśli przede wszystkim osoby zatrudnione w straży pożarnej, policji, organach inspektoratu budowlanego, odpowiednich oddziałach służb wewnętrznych i administracji państwowej, które są zobowiązane do przestrzegania procedur w zakresie bezpieczeństwa antyterrorystycznego. Adresujemy je także do inżynierów wielu branż, zajmujących się projektowaniem obiektów budowlanych, w których wskazane jest zastosowanie specjalnych środków przeciwdziałania zamachowi oraz ewentualnej minimalizacji jego skutków.

Można przewidywać wzrost zagrożenia terrorystycznego i stąd, co jest naturalne, wzrost oczekiwań społecznych odnośnie do zapewnienia bezpieczeństwa. Wydawnictwo niniejsze może więc zainteresować także osoby, które dopiero rozważają swe przyszłe zaangażowanie w działania zapewniające to bezpieczeństwo. Takie działania muszą być wielostronne i kompleksowe, stąd jest tu miejsce dla osób o różnych profilach wykształcenia, jednak muszą się one cechować zdolnościami i chęćmi do myślenia innowacyjnego, bowiem w zamachach terrorystycznych nie obowiązują ustalone zasady odnośnie do miejsca i sposobu dokonania zamachu. Dlatego opisywane w niniejszym podręczniku działania prewencyjne nie tylko są celowe i pożyteczne, ale zaangażowanie się w nie może dawać wielką satysfakcję i poczucie dobrze spełnionego obowiązku na drodze budowania świadomości i prawdziwej ochrony życia. Chcąc spełnić oczekiwania szerokiego grona czytelników, w podręczniku opisano różne klasy działań prewencyjnych, przechodząc kolejno od zasad ogólnych do wiedzy szczegółowej, dotyczącej komputerowej analizy katastrofy i oceny bezpieczeństwa obiektów budowlanych.

W pierwszej części podręcznika podstawą wybranych analiz są przepisy istniejące w Polsce. Omówiono te przepisy oraz wskazano na celowość wprowadzenia

do wymogów projektowania i użytkowania obiektów budowlanych dalszych zasad oraz przepisów prawa, które mogą poprawić bezpieczeństwo budowli i przebywających w nich osób. Dotyczy to zwłaszcza tzw. obiektów infrastruktury krytycznej, w których jednocześnie przebywają tysiące osób lub które z pewnych względów muszą podlegać szczególnej ochronie. Rozdział 1 wprowadza czytelnika w problematykę zapobiegania aktom terrorystycznym, przede wszystkim przez stosowanie form ochrony pasywnej. Wykorzystano tu w dużym stopniu wiedzę i przepisy rozwinięte przez straż pożarną. Rozdział dotyczy jednak nie tylko pożarów, ale szerokiej klasy wybuchów, w tym terrorystycznych. W rozdziale 2 opisano rozwiązania urbanistyczne i architektoniczne typu prewencyjnego, a także zmniejszające skutki wybuchu. Omówiono podstawowe zasady projektowania urbanistycznego i architektonicznego w warunkach zagrożenia terrorystycznego, ilustrując je licznymi fotografiami. W rozdziale 3 rozwinięto tę wiedzę z ukierunkowaniem na akty terrorystyczne z użyciem materiałów wybuchowych detonowanych w pobliżu budynku lub jego elementów konstrukcyjnych.

W drugiej części podręcznika przedstawiono wiedzę z zakresu komputerowej analizy skutków wybuchu oraz metod projektowania konstrukcji o podwyższonej odporności na wybuch. Rozdział 4 zawiera wyniki przeprowadzonej analizy literatury na omawiane tematy. Szczególną uwagę zwrócono na te normy i podręczniki, które mogą być wykorzystane w komputerowej analizie bezpieczeństwa konstrukcji. Omówiono Polskie Normy, normy europejskie EC i literaturę amerykańską. Rozdział ten jest tak zredagowany, że pełni funkcję przewodnika po literaturze. Czytelnik uzyska wskazówki, w jakich pozycjach literatury znajdzie interesujące go informacje i które pozycje są ogólnodostępne. Pozwoli to zaoszczędzić czas i obniżyć koszty poszukiwania informacji. Wskazówki te są szczególnie cenne w odniesieniu do literatury USA zawierającej wiele pozycji (także w formie raportów) o ograniczonym dostępie. W rozdziale 5 opisano zjawisko powstawania i rozchodzenia się fali powietrznej (akustycznej) wywołanej wybuchem i obliczanie ciśnienia wywieranego na napotkane ciała stałe, w tym na elementy konstrukcji. Podano informacje o dostępnym oprogramowaniu. Rozdział 6 zawiera informacje o związkach konstytutywnych dotyczących materiałów powszechnie stosowanych w budownictwie tzn. stali, betonu i muru. W analizie uwzględniono duże prędkości deformacji. W rozdziale 7 zaprezentowano przykłady komputerowego modelowania zachowania wybranych elementów konstrukcji budynku (słupy, ściany, stropy) w warunkach wybuchu materiału umieszczonego w ich pobliżu. Pokazano charakterystyczne cechy komputerowego modelowania procesów towarzyszących wybuchowi, w tym różnice w stosunku do modelowania zjawisk jakie występują w typowym projektowaniu konstrukcji. Autorzy uzyskali eksperymentalne potwierdzenie poprawności zastosowanego modelowania na poligonie wojskowym. Rozdział 8 pt. *Posłowie* zawiera wnioski z badań.

Podręcznik został tak zredagowany, że czytelnik może wynieść korzyści, studiując tylko wybrane rozdziały w zależności od swych zainteresowań. Do rąk

czytelnika oddajemy tę książkę w nadziei, że wiedza z niej zaczerpnięta przyczyni się do lepszego zrozumienia istoty zagrożenia, a tym samym do podejmowania działań zwiększających bezpieczeństwo ludzi i obiektów.

W imieniu zespołu autorów życzymy pouczającej lektury i satysfakcji z czasu przeznaczanego na zadumę nad naszym bezpieczeństwem. Wszakże cała działalność inżynierska nakierowana jest na spełnienie oczekiwań człowieka, a w szczególności na projektowanie obiektów budowlanych zapewniających bezpieczeństwo.

Tomasz Łodygowski i Andrzej Garstecki

1. Zagadnienia bezpieczeństwa obiektu budowlanego

1.1. Analiza ryzyka – identyfikowanie i ocena zagrożeń

1.1.1. Bezpieczeństwo i ochrona

Celem badania poziomu bezpieczeństwa oraz skuteczności środków zabezpieczenia technicznego i ochrony fizycznej jest ustalenie poziomu zagrożenia obiektu przed podjęciem prac projektowych i wykonawczych w zakresie technicznych środków bezpieczeństwa bądź przed zastosowaniem ochrony fizycznej obiektu oraz stwierdzenie poziomu bezpieczeństwa po wystąpieniu w nim rzeczywistego zagrożenia przestępnego lub obawy wystąpienia takiego zagrożenia. Trudności badania bezpieczeństwa wynikają z nieznamomości rodzajów czynów zabronionych (przestępstw), form i metod postępowania ich sprawców, braku znajomości metod i technik postępowania badawczego mającego na celu całościową ocenę bezpieczeństwa obiektu oraz braku ścisłych kryteriów wyznaczania sprawności środków zabezpieczenia i ochrony.

W badaniu bezpieczeństwa obiektu istotna jest charakterystyka miejsca i otoczenia obiektu, wyznaczenie i ocena naturalnych i przestępnych zagrożeń oraz wskazanie sposobów i środków ich neutralizacji, a także ocena bezpieczeństwa obiektu z uwzględnieniem zastosowanych zabezpieczeń budowlano-mechanicznych, systemu alarmowego, dozorowego w formie optoelektronicznej i audiowizualnej. Odrębną, lecz przyczyniającą się do ogólnej charakterystyki bezpieczeństwa, sferą jest ochrona osób i mienia obiektu (wyposażenie ruchome), zwłaszcza gdy związana jest z ochroną osobistą osób o statusie VIP, a sprawowaną przez specjalistów (ang. *bodyguard*) czy oddziały służb specjalnych.

Warto tutaj zwrócić uwagę na określone w ustawie [1997] rygory prawne i rozdzielenie kompetencji – poświadczonych licencją wydawaną przez wojewódzkich komendantów policji – specjalistów ochrony fizycznej i specjalistów zabezpieczenia technicznego. Zadania ochrony mogą być wykonywane przez wewnętrzne służby ochrony lub przedsiębiorstwa posiadające koncesję na prowadzenie działalności gospodarczej w zakresie ochrony osób i mienia. Do pewnego zakresu usług ochrony fizycznej nie jest wymagana licencja.

Pojęcie bezpieczeństwa i ochrony jest różnie rozumiane i stosowane [Crouch, Shaftoe i Fleming 2001]. Zanim skupimy uwagę czytelnika na zagadnieniach bezpiecznego rozwiązania konstrukcyjnego w budynkach, obiektach lub elementach infrastruktury, zostanie przedstawiona w niniejszym rozdziale ogólna tematyka bezpieczeństwa i ochrony przed zagrożeniami. Analiza, wybór i zastosowanie środków bezpieczeństwa, należyte ich funkcjonowanie, przestrzeganie reguł organizacyjno-prawnych prowadzi do uzyskania bezpieczeństwa. Niżej wprowadzono pojęcia związane z bezpieczeństwem i ochroną, przedstawiono

wybraną metodę [Nowicki 2002] analizy bezpieczeństwa oraz podano przykład jej przeprowadzenia w rzeczywistych warunkach.

W europejskiej normie PN-EN 14383: [2006] *Zapobieganie przestępczości. Planowanie urbanistyczne i projektowanie budynków* jest podana następująca definicja: „*Nielicencjonowany pracownik ochrony. Indywidualny pracownik (nie będący specjalnie wytrenowanym do ochrony innych cywili), którego działalność polega na obserwacji w celu powstrzymania działalności przestępczej oraz informowaniu o incydencie odpowiednich służb w celu podjęcia przez nie interwencji*”.

Bezpieczeństwo – wolność od ryzyka albo niebezpieczeństwa

Ochrona – wolność przed zamierzonym niebezpieczeństwem

W normie PN-EN 14383-1: [2006] są definiowane także **niebezpieczeństwo** i ryzyko. Są to oczywiście terminy o szerszym znaczeniu niż zamierzone **niebezpieczeństwo**. Szczęśliwie dla ludzkości niektóre niebezpieczeństwa są nadal poza kontrolą pojedynczego człowieka czy społeczności ludzkich. Można wymienić takie niezamierzone niebezpieczeństwa, jak wybuchy wulkanu, trąby powietrzne i huragany, burze z piorunami, burze piaskowe, burze śnieżne, trzęsienia ziemi, sztormy, fale oceaniczne typu tsunami, by ograniczyć się do zjawisk naturalnych stwarzających zagrożenie dla obiektów budowlanych.

Zjawiska naturalne zalicza się do niezamierzonych niebezpieczeństw. Są one poza możliwością kontroli przez człowieka lub społeczności ludzkie. Człowiek dysponuje jednak potencjałem niszczącym, który może spowodować zjawiska nienaturalne podobne do wyżej wymienionych. Jako katastrofy mogą one dotyczyć obiektów budowlanych, więc w postępowaniu inżynierskim – projektowaniu, wykonywaniu, modernizacji, wzmacnianiu obiektów budowlanych – muszą być brane pod uwagę. W zakresie ochrony również są zróżnicowane możliwości bądź brak możliwości kontroli wydarzeń przez człowieka lub społeczność ludzką. Zapewnianie ochrony, ale bez pełnej wolności od niebezpieczeństwa z powodu niezamierzonego przebiegu wydarzeń, czyli wypadku, jest działaniem niedopełnionym. Ten margines niebezpieczeństwa to cenna wiedza i umiejętności doświadczonego inżyniera.

Na gruncie nauki prawa problemy bezpieczeństwa i ochrony związanej z zamierzonym przypadkiem sankcjonowanym przez prawo określa się terminem zagrożenie przestępne. Zamierzone niebezpieczeństwo jest czynem zabronionym przez prawo.

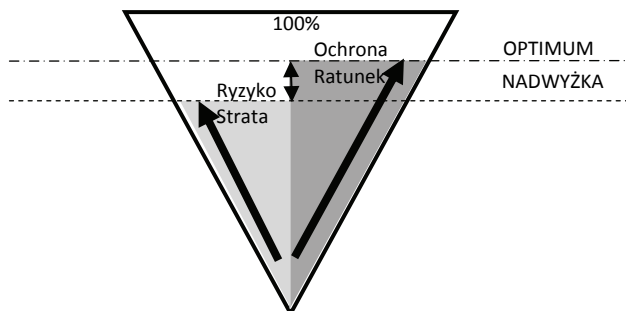
Marzenia ludzi o życiu w sytuacji całkowitego braku zagrożenia muszą pozostać niespełnione. W żadnym miejscu na świecie i momencie historycznym mi-

mo różnych środków politycznych i przymusu (w większości okrutnego ograniczenia praw i wolności człowieka) nie zdołano zapewnić ludziom bezpieczeństwa, chociażby na poziomie wspólnie lub/i indywidualnie akceptowanym.

Stan absolutnego, 100-procentowego bezpieczeństwa jest nieosiągalny. Przyczynia się do tego konkurowanie dwóch przeciwstawnych części społeczności: jedna grupa podnosi poziom bezpieczeństwa, a druga podnosi poziom zagrożenia. Grupa zapewniająca ochronę jest w stanie ciągłej walki z grupą doskonalącą się w popełnianiu czynów zbraniowych. Walka ta toczy się również w wymiarze czasu, o to, kto będzie szybszy w działaniu – sprawca w realizacji swego zamiaru, czy ochraniający dążący do ujęcia sprawcy na gorącym uczynku lub w bezpośrednim pościgu. Działanie napotyka przeciwdziałanie, przy czym cele obu stron są przeciwstawne: zapewnienie bezpieczeństwa i stworzenie zagrożenia.

Jest optymalny stan poziomu bezpieczeństwa, w danych warunkach miejsca i czasu, będący kompromisem pomiędzy ilością i jakością środków ochrony i stanem zagrożenia, poziomem ryzyka czy niebezpieczeństwa. Wzrastający poziom zagrożenia musi pociągać za sobą co najmniej dorównujący mu wzrost poziomu ochrony. Nawet więcej, konieczne jest przekroczenie poziomu zagrożenia o różnicę mającą na celu stworzenie większych trudności potencjalnemu sprawcy oraz odwiecenie go od podjęcia działań skutkujących wzrostem niebezpieczeństwa. Ta różnica/nadwyżka powinna w należyтым stopniu zapewniać działania profilaktyczne.

Optymalny poziom bezpieczeństwa można zobrazować za pomocą trójkąta (rys. 1.1). Lewy jasnoszary trójkąt i strzałka wyznaczają poziom niebezpieczeństwa (nakłady na przestępstwo). Prawy ciemnoszary trójkąt i strzałka wyznaczają poziom ochrony (nakłady na bezpieczeństwo). Różnica pomiędzy poziomem bezpieczeństwa i niebezpieczeństwa to nadwyżka profilaktyki. Zalecana wartość nadwyżki to 10% nakładów na zapewnienie bezpieczeństwa, by poziom ryzyka nie przewyższał 90% poziomu ochrony. Duży trójkąt nie jest cały wypełniony, gdyż nie można zapewnić 100% ochrony/bezpieczeństwa. Przy optymalnym stanie bezpieczeństwa jest utrzymywana nadwyżka ochrony nad ryzykiem.



Rys. 1.1. Trójkąt bezpieczeństwa

Spektrum niebezpieczeństwa (zagrożeń przestępnych) w budynku jest niezwykle szerokie (niebezpieczeństwo państwa, powszechne i indywidualne, spowodowane siłami wyższymi i prawami natury, wolności, godności i czci człowieka, współzycia społecznego, zachowania ostrożności, dystansu i niewywolywania strachu, psychozy, paniki, zachowania tłumu i zachowania zbiorowego ludzi, informacji i mass mediów, a także sytuacji wewnętrznej firmy, konkurencyjności, zasad rynku finansowego oraz w sferze gospodarczej). Wyczerpuje ono znamiona niemal wszystkich czynów zabronionych zapisanych w ustawie karnej i przedstawia różną delegiwość prawną.

Analogicznie do systematyki kodeksu karnego (w ujęciu przepisów ustawy Kodeks karny [1997]) prawo określa między innymi przestępstwa przeciwko:

- życiu i zdrowiu osób:
 - a) zabójstwo (art. 148 k.k.),
 - b) nieumyślne spowodowanie śmierci (art. 155 k.k.),
 - c) naruszenie czynności ciała (art. 156–157 k.k.),
 - d) pobicie (art. 158 k.k.),
- bezpieczeństwu powszechnemu:
 - a) spowodowanie zdarzenia pożaru, zawalenia budowli, zawalenie albo osunięcie ziemi, skał lub śniegu, eksplozji materiałów wybuchowych, gwałtownego wyzwolenia energii, substancji trujących, duszących lub parzących (art. 163 k.k.),
 - b) spowodowanie epidemii, uszkodzenie dostaw wody, światła, ciepła, gazu i energii, informacji (art. 165 k.k.),
- bezpieczeństwu w komunikacji:
 - a) spowodowanie katastrofy w ruchu lądowym, wodnym lub powietrznym (art. 173 k.k.),
- środowisku:
 - a) zniszczenia w świecie roślinnym lub zwierzęcym (art. 181 k.k.),
 - b) zanieczyszczenie wody, powietrza lub powierzchni ziemi (art. 182 k.k.),
- wolności:
 - a) pozbawienie człowieka wolności (art. 189 k.k.),
 - b) nękanie, wzbudzanie zagrożenia, naruszenie prywatności (art. 190 k.k.),
- działalności państwa i samorządu:
 - a) naruszenie nietykalności cielesnej funkcjonariusza publicznego na służbie (art. 222 k.k.),
 - b) czynna napaść na funkcjonariusza publicznego (art. 223 k.k.),
 - c) znieważenie funkcjonariusza publicznego (art. 226 k.k.),
 - d) udział w grupie lub związku mającym na celu popełnienie czynu zabronionego (art. 258 k.k.),
- ochronie informacji: ujawnienie tajemnicy państwowej i służbowej (art. 265–266 k.k.),

- wiarygodności dokumentów: podrabianie i przerabianie dokumentu (art. 270 k.k.),
- mieniu:
 - a) zabór mienia w celu przywłaszczenia (art. 278 k.k.),
 - b) kradzież z włamaniem (art. 279 k.k.),
 - c) rozbój (art. 280 k.k.),
 - d) kradzież rozbójnicza (art. 281 k.k.),
 - e) wymuszenie rozbójnicze (art. 282 k.k.),
 - f) niszczenie mienia (art. 288 k.k.).

Analizę zagrożeń w obiekcie prowadzi się także, rozważając jego funkcje:

- podstawowe (np. widowisko sportowe, magazyn, produkcja),
- utrzymanie ruchu,
- gospodarka materiałowa i magazynowa,
- transport,
- łączność,
- gospodarka finansowa,
- system informacyjny,
- system zabezpieczeń socjalnych,
- system zabezpieczenia i ochrony.

Ze względu na topografię obiektu rozpatruje się przykładowo:

- piwnicę (pomieszczenie A, B, C, korytarz, klatka schodowa),
- parter (pomieszczenie 1, 2, 3, korytarz, schody lewe, prawe, ewakuacyjne),
- pierwsze piętro (pomieszczenie 101, 102, 103, korytarz, klatka schodowa),
- strefę peryferyjną (ulica adresu, ulica sąsiednia, skwer, sąsiednie domy),
- strefę zewnętrzną (dach, taras, platforma widokowa, podwórko, parking).

W celu przeprowadzenia analizy zagrożeń przestępnych rozważamy:

- unormowania prawne:
 - a) zgodność prawa wewnętrznego z prawem powszechnie obowiązującym,
 - b) zakres regulacji prawem wewnętrznym,
 - c) sposób regulacji prawem wewnętrznym z punktu widzenia skuteczności ograniczenia zagrożeń przestępnych,
- procesy technologiczne w obiekcie:
 - a) dobór i rozmieszczenie personelu w miejscach i w czasie,
 - b) stosowanie urządzeń i systemów technicznych,
 - c) wykorzystanie technologii (formy i metody działania),
 - d) wykorzystanie materiałów,
 - e) wykorzystanie systemów informacyjnych do zarządzania pracą personelu, procesami technologicznymi i materiałowymi oraz sygnalizujące zagrożenia,
 - f) sposoby kierowania procesami techniczno-technologicznymi oraz innymi elementami procesu gospodarowania (administrowania),

- procesy organizacji i zarządzania ludźmi i składnikami materialnymi oraz działania związane z utrzymaniem ruchu:
 - a) organizacja ruchu osobowego (kontrola wejścia i wyjścia ludzi, ruch ludzi wewnątrz obiektu, wykorzystanie technicznych środków kontroli wejścia, wyjścia, obecności),
 - b) organizacja ruchu materiałowego (kontrola wjazdu i wyjazdu środków transportu, magazynowanie i przechowywanie wewnątrz obiektu, obrót materiałami wewnątrz obiektu, wykorzystanie technicznych środków kontroli w obrocie materiałowym, dobór ludzi do obrotu materiałowego),
 - c) organizacja obrotu pieniężnego (lokalizacja punktów obrotu pieniężnego, sposób przechowywania pieniędzy, sposób zasilania w pieniądze, dobór ludzi do obsługi obrotu pieniężnego),
- rozwiązania architektoniczno-budowlane i infrastrukturalne:
 - a) lokalizacja obiektu i jego kształt,
 - b) konstrukcja obiektu i użyte materiały,
 - c) wewnętrzne funkcje poszczególnych elementów obiektu,
 - d) otoczenie obiektu (sfera peryferyjna),
 - e) ogrodzenie obiektu,
 - f) oświetlenie obiektu,
 - g) wewnętrzne drogi i miejsca parkingowe,
 - h) instalacje elektryczne,
 - i) instalacje wodne,
 - j) instalacje kanalizacyjne,
 - k) instalacje klimatyzacyjne,
 - l) instalacje odgromowe,
 - m) instalacje przeciwpożarowe,
- urządzenia i systemy mechanicznego zabezpieczenia:
 - a) zamki i okucia otworów,
 - b) inne środki zabezpieczenia (kraty, szyby),
 - c) środki przechowywania wartości pieniężnych,
 - d) środki transportowania wartości pieniężnych,
- urządzenia i systemy elektronicznego zabezpieczenia:
 - a) urządzenia i systemy alarmowe,
 - b) urządzenia i systemy wspomagające (kontrola i sterowanie dostępem),
 - c) urządzenia i systemy przekazywania informacji o zagrożeniach do służb interwencyjnych,
- ochrona fizyczna:
 - a) przygotowanie działań ochronnych,
 - b) formy ochrony fizycznej,
 - c) liczebność pracowników dozoru i ochrony,
 - d) uzbrojenie pracowników ochrony,
 - e) wyposażenie pracowników dozoru i ochrony,

- f) łączność pracowników dozoru i ochrony,
- g) transportowanie chronionych wartości,
- h) szybkość reagowania na zagrożenia pracowników dozoru i ochrony oraz służb interwencyjnych (policji, straży pożarnej).

Wyróżnia się trzy grupy sprawców czynu zabronionego:

- intruz – nieproszony gość (z zewnątrz) – przestępstwa: zabójstwo, uszkodzenie ciała, kradzież mienia ruchomego, kradzież z włamaniem, kradzież zuchwała, kradzież rozbójnicza, rozbój (rabunek), wymuszenie rozbójnicze, podpalenie, zniszczenie mienia,
- pracownik – znajduje się w obiekcie na podstawie stosunku pracy lub pokrewnym (zatrudniony wewnątrz) – przestępstwa: nieumyślne spowodowanie śmierci, spowodowanie niebezpieczeństwa pożaru lub katastrofy, łapownictwo, zabór mienia, nadużycie uprawnień, przestępstwa informatyczne, naruszenie tajemnicy państwowej, służbowej lub przedsiębiorstwa,
- kontrahent – proszony gość, klient, interesant (pozostający z obiektem w stosunku faktycznym lub prawnym) – przestępstwa: wyłudzenie mienia, fałszerstwa dokumentów, oszustwo, pranie brudnych pieniędzy.

1.1.2. Zagrożenia wybuchem

W związku z zagrożeniem wybuchem analizuje się zachowanie konstrukcji w sytuacjach wyjątkowych, związanych z nagłym, krótkotrwałym, szybkim obciążeniem w postaci detonacji ładunku wybuchowego. Bada się szczegółowe skutki fizyczne wybuchu, a więc ciśnienie i jego rozkład w przestrzeni i w czasie oraz jego oddziaływanie na konstrukcję lub jej elementy. Przedmiotem analizy konstrukcji jest wystąpienie i przebieg zniszczenia jej elementów oraz katastrofa obiektu wraz z etapami zawałania się budynku lub obiektu inżynierskiego.

Pod względem formalnym (pominąwszy obszar militarny) kwestie związane z wybuchem przynależą do ochrony przeciwpożarowej budynków, innych obiektów i terenów [Ustawa 1991, 2011; Rozporządzenie 1991, 2011]. W rozporządzeniach [2003, 2006] są podane definicje:

- zagrożenie wybuchem – możliwość tworzenia przez palne gazy, pary palnych cieczy, pyły lub włókna palnych ciał stałych w różnych warunkach mieszanin z powietrzem, które pod wpływem czynnika inicjującego zapłon (iskra, łuk elektryczny lub przekroczenie temperatury samozapłonu) wybuchają, czyli ulegają gwałtownemu spalaniu połączonemu ze wzrostem ciśnienia,
- pomieszczenie zagrożone wybuchem – pomieszczenie, w którym może się wytworzyć mieszanina wybuchowa, powstała z wydzielającej się takiej ilości palnych gazów, par, mgieł lub pyłów, której wybuch mógłby spowodować przyrost ciśnienia w tym pomieszczeniu przekraczający 5 kPa,

- strefa zagrożenia wybuchem – przestrzeń, w której może występować mieszanina wybuchowa substancji palnych z powietrzem lub innymi gazami utleniającymi o stężeniu zawartym między dolną i górną granicą wybuchowości.

Z kolei w normie PN-EN 21127 [2011] są zdefiniowane:

- dolna (górną) granica wybuchowości (DGW, GGW),
- dolna (górną) granica zakresu wybuchowości,
- zakres wybuchowości – zakres stężenia substancji palnej w powietrzu, w którym może dojść do wybuchu,
- przestrzeń zagrożona wybuchem – przestrzeń, w której zależnie od warunków lokalnych i ruchowych może wystąpić atmosfera wybuchowa,
- atmosfera wybuchowa – mieszanina substancji palnych w postaci gazów, par, mgieł lub pyłów z powietrzem w warunkach atmosferycznych, w której po zapaleniu spalanie rozprzestrzenia się na całą niespaloną mieszaninę.

W wyniku oceny zagrożenia wybuchem wskazuje się:

- zagrożenie wybuchem pomieszczeń i przestrzeni zewnętrznych,
- pomieszczenia zagrożone wybuchem,
- strefy zagrożenia wybuchem w pomieszczeniach,
- strefy zagrożenia wybuchem w przestrzeniach zewnętrznych,
- czynniki mogące spowodować zapłon.

Ocenie zagrożenia wybuchem powinny być poddane obiekty i tereny przyległe, gdzie są prowadzone procesy technologiczne z użyciem materiałów mogących wytworzyć mieszaniny wybuchowe lub takie materiały są magazynowane.

Zagrożenie wybuchem oceniają inwestor, projektant lub użytkownik decydujący o procesie technologicznym. W ocenie tej należy brać pod uwagę:

- sytuację najbardziej niekorzystną z punktu widzenia ewentualnych skutków wybuchu, mogącą wystąpić w pomieszczeniach podczas eksploatacji,
- najbardziej niebezpieczną, używaną substancję,
- największą ilość tej substancji, która może wziąć udział w reakcji chemicznej powodującej wybuch.

Decyzja o zakwalifikowaniu pomieszczenia jako zagrożonego wybuchem gazu wpływa m.in. na:

- usytuowanie budynku względem innych budynków,
- lokalizację pomieszczenia w budynku,
- dobór zabezpieczeń technicznych chroniących pomieszczenie przed skutkami wybuchu,
- rozwiązania materiałowo-konstrukcyjne pomieszczenia (budynku) zagrożonego wybuchem w celu ochrony przed skutkami wybuchu,
- wielkość stref pożarowych w budynku,
- długość przejść i dojść ewakuacyjnych,
- kierunek otwierania drzwi ewakuacyjnych,

- rozwiązania techniczno-budowlane wyjść ewakuacyjnych i ich liczbę,
- rozwiązania techniczno-budowlane pionowych dróg ewakuacyjnych (klatek schodowych),
- zapewnienie możliwości dojazdu jednostek ochrony przeciwpożarowej (drogi pożarowe).

W pomieszczeniu należy wyznaczyć strefę zagrożenia wybuchem, jeżeli w zwartej przestrzeni może w nim występować mieszanina wybuchowa o objętości co najmniej $0,01 \text{ m}^3$. Strefy zagrożenia wybuchem, wyznaczone w pomieszczeniach i przestrzeniach zewnętrznych, klasyfikuje się w następujący sposób:

- strefa 0 – miejsce, w którym atmosfera wybuchowa, zawierająca mieszaninę substancji palnych w postaci gazu, pary albo mgły z powietrzem, występuje stale lub przez długie okresy, lub często,
- strefa 1 – miejsce, w którym atmosfera wybuchowa, zawierająca mieszaninę substancji palnych w postaci gazu, pary albo mgły z powietrzem, może czasami wystąpić w trakcie normalnego działania,
- strefa 2 – miejsce, w którym atmosfera wybuchowa, zawierająca mieszaninę substancji palnych w postaci gazu, pary albo mgły z powietrzem, nie występuje w trakcie normalnego działania, a w przypadku wystąpienia trwa krótko,
- strefa 20 – miejsce, w którym atmosfera wybuchowa w postaci obłoku palnego pyłu w powietrzu występuje stale lub przez długie okresy, lub często,
- strefa 21 – miejsce, w którym atmosfera wybuchowa w postaci obłoku palnego pyłu w powietrzu może czasami wystąpić w trakcie normalnego działania,
- strefa 22 – miejsce, w którym atmosfera wybuchowa w postaci obłoku palnego pyłu w powietrzu nie występuje w trakcie normalnego działania, a w przypadku wystąpienia trwa krótko.

Uwaga: Omawiane w rozporządzeniu [2003] zagrożenie wybuchem nie jest traktowane jako skutek następstwa o charakterze terrorystycznym. Inwestor, projektant i technolog nie są zobligowani, według powyższego rozporządzenia, do uwzględnienia skutków działań terrorystycznych.

W normie PN-EN 60079 [2002] są podane podstawowe zasady bezpieczeństwa w strefach zagrożonych wybuchem:

- minimalizować emisję materiałów palnych, jej częstość, czas trwania i ilość (przez co zmniejsza się zasięg stref zagrożenia wybuchem) przez odpowiednie projektowanie, eksploatację i konserwację instalacji,
- czynności konserwacyjne, niewystępujące podczas normalnej pracy, a mogące zwiększać strefy zagrożone wybuchem, należy wykonywać w dopuszczonym systemie pracy,
- w sytuacjach awaryjnych należy: odłączyć nieodpowiednie urządzenia elektryczne, zatrzymać proces, odłączyć aparaty technologiczne, zabezpieczyć wycieki, zapewnić dodatkową wentylację awaryjną (jeżeli jest to możliwe).

Gdy może wystąpić gazowa atmosfera wybuchowa, należy wyeliminować prawdopodobieństwo pojawienia się źródła zapłonu lub gazowej atmosfery wybuchowej wokół źródła zapłonu. Jeżeli nie jest to możliwe, należy dobrać i przygotować środki zabezpieczające, wyposażenie technologiczne, systemy i procedury tak, aby prawdopodobieństwo jednoczesnego wystąpienia atmosfery gazowej i zapłonu było akceptowalnie małe.

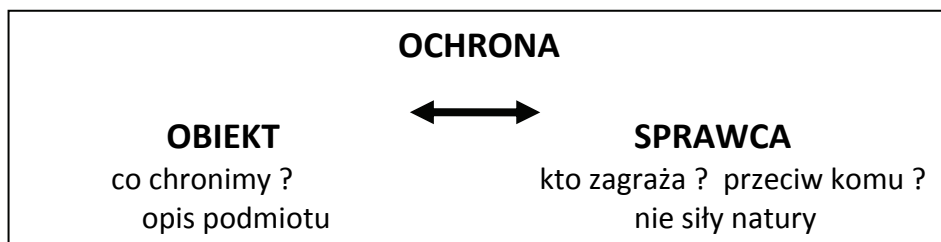
1.2. Środki ochrony – zapewnienie bezpieczeństwa

1.2.1. Ochrona obiektów infrastruktury przed zagrożeniami

Z przedstawionego wyżej wykazu zagrożeń i czynników wpływających na stan zagrożenia wynika, że zapewnienie bezpieczeństwa zależy od wielu elementów. Zastosowanie środków ochrony z reguły działa jednostkowo, tzn. jeden środek zwiększa ochronę przed jednym zagrożeniem. Zastosowanie jednego, specyficznego środka ochrony rzadko zabezpiecza przed kilkoma zagrożeniami.

Po zniszczeniu wieżowców WTC w Nowym Jorku we wrześniu 2001 roku, zamachach w metrze w Londynie i na dworcu kolejowym w Madrycie uległo zmianie znaczenie zagrożenia pochodzącego od dzieła uczynionego ludzką ręką. Dotychczas, poza stanem wypowiedzianej i prowadzonej wojny pomiędzy państwami, nie było potrzeby brania pod uwagę zagrożenia obiektu infrastruktury, którego następstwem jest utrata życia przez setki osób oraz spektakularna, nastawiona na medialny efekt destrukcja. Oczywista stała się potrzeba ochrony infrastruktury transportowej. Lotniska, dworce kolejowe, stacje metra, mosty to obiekty o wysokim poziomie zagrożenia. Prawdopodobieństwo zaistnienia ataku terrorystycznego w takich miejscach musi być brane pod uwagę. Wcześniej pominięcie zagrożeń terrorystycznych nie budziło wątpliwości. Obecnie rozważenie skutków ataku terrorystycznego należy traktować jako element rzeczywistości, a nie wyobraźni.

Z wielu analiz wynika, że w sytuacji wybuchu i trzęsienia ziemi skutki tych zjawisk i zachowanie konstrukcji budynku są podobne. W odniesieniu do obu zagrożeń potrzebna jest analiza stopniowego zniszczenia konstrukcji, a także środków zmniejszających nagłe obciążenia wyjątkowe (redundancji bądź ciągłości), a szczególnie ocena wrażliwości i odporności na różnorodny przebieg takich zagrożeń. Zaleca się, aby te same zespoły inżynierskie analizowały różne sytuacje wyjątkowe, gdyż wówczas uzyskuje się lepsze wyniki rozwiązywania problemu. Rozdzielanie analizy i przyjmowania decyzji o wzmocnieniu i rekonstrukcji obiektów w odrębnych sytuacjach wyjątkowych prowadzi do gorszych efektów.



Rys. 1.2. Ochrona, obiekt, sprawca

1.2.2. Obiekty chronione

Według ustawy [1997] obszary, obiekty, urządzenia i transporty ważne dla obronności, interesu gospodarczego, bezpieczeństwa publicznego i innych ważnych interesów państwa podlegają obowiązkowej ochronie przez specjalistyczne uzbrojone formacje ochronne lub odpowiednie zabezpieczenie techniczne. Do obszarów, obiektów i urządzeń podlegających obowiązkowej ochronie należą:

- w zakresie obronności państwa w szczególności: zakłady produkcji specjalnej oraz zakłady, w których prowadzone są prace naukowe lub konstruktorskie w zakresie takiej produkcji, zakłady produkujące, remontujące i magazynujące uzbrojenie, urządzenia i sprzęt wojskowy, magazyny rezerw strategicznych,
- w zakresie ochrony interesu gospodarczego państwa w szczególności: zakłady mające bezpośredni związek z wydobywaniem surowców mineralnych o strategicznym znaczeniu dla państwa, porty morskie i lotnicze, banki i przedsiębiorstwa wytwarzające, przechowujące bądź transportujące wartości pieniężne w znacznych ilościach,
- w zakresie bezpieczeństwa publicznego w szczególności: zakłady, obiekty i urządzenia mające istotne znaczenie dla funkcjonowania aglomeracji miejskich, których zniszczenie lub uszkodzenie może stanowić zagrożenie dla życia i zdrowia ludzi oraz środowiska, w szczególności elektrownie i ciepłownie, ujęcia wody, wodociągi i oczyszczalnie ścieków, zakłady stosujące, produkujące lub magazynujące w znacznych ilościach materiały jądrowe, źródła i odpady promieniotwórcze, materiały toksyczne, odurzające, wybuchowe bądź chemiczne o dużej podatności pożarowej lub wybuchowej, rurociągi paliwowe, linie energetyczne i telekomunikacyjne, zapory wodne, śluzy oraz inne urządzenia znajdujące się w otwartym terenie;
- w zakresie ochrony innych ważnych interesów państwa w szczególności: zakłady o unikatowej produkcji gospodarczej, obiekty i urządzenia telekomunikacyjne, pocztowe oraz telewizyjne i radiowe, muzea i inne obiekty, w których zgromadzone są dobra kultury narodowej, archiwa państwowe.

Szczegółowe wykazy obszarów, obiektów i urzędów chronionych sporządzają: Prezes Narodowego Banku Polskiego, Krajowa Rada Radiofonii i Telewizji, ministrowie, kierownicy urzędów centralnych i wojewodowie w stosunku do podległych, podporządkowanych lub nadzorowanych jednostek organizacyjnych. Umieszczenie w wykazie określonego obszaru, obiektu lub urzędu następuje w drodze decyzji administracyjnej. Prezes Narodowego Banku Polskiego, Krajowa Rada Radiofonii i Telewizji, ministrowie i kierownicy urzędów centralnych przesyłają wykazy do właściwych terytorialnie wojewodów oraz na bieżąco je aktualizują. Wojewodowie prowadzą ewidencję obszarów, obiektów i urzędów podlegających obowiązkowej ochronie, znajdujących się na terenie województwa. Ewidencja ma charakter poufny. Wojewoda decyzją administracyjną może umieścić w ewidencji dodatkowe obszary, obiekty i urzędy innych podmiotów znajdujące się na terenie województwa.

1.2.3. Opracowanie systemu ochrony

Analiza i diagnoza oraz prognoza funkcjonowania ochrony jest oparta na wejściu w rolę sprawcy i rozpoznaniu:

- jak obecnie obiekt jest chroniony i którądy wejdzie sprawca zagrożenia:
 - a) pokonując otoczenie obiektu – strefa peryferyjna,
 - b) pokonując bezpośrednie sąsiedztwo – strefa zewnętrzna,
 - c) pokonując struktury obiektu – strefa wewnętrzna: brama, ogrodzenie, drzwi, okno, ściany, podłogi, sufity, dach,
- jak wejdzie: jawnie z bronią, stosując przymus, stosując podstęp,
- jakie środki zastosować, aby uzyskać określony czas reakcji systemu ochrony. Do dyspozycji są następujące rodzaje środków ochrony [Nowicki 2002]:
- prawne:
 - a) kompetencje instytucji i organizacji powołanych do zwalczania zagrożeń przestępnych oraz zasady ich współpracy,
 - b) wymagania wobec środków ochrony i ich kontroli,
 - c) naprawianie szkód wynikłych z zagrożeń;
- organizacyjno-taktyczne:
 - a) organizacja sił i środków zwalczania zagrożeń w instytucji – obiekcie,
 - b) plany ochrony obiektu, instrukcje i procedury reakcji na zagrożenia, ewakuacja,
 - c) szkolenie i doskonalenie personelu obiektu oraz pracowników jego ochrony;
- architektoniczno-budowlane:
 - a) lokalizacja obiektu (położenie, dojazd, oświetlenie) oraz jego kształt,
 - b) konstrukcja obiektu (materiały, wzmocnienia, otwory, ukryte pomieszczenia),
 - c) funkcje wewnętrzne (podział na strefy ochronne);

- mechaniczne:
 - a) zamki, okucia otworów oraz inne środki zabezpieczenia (kraty, szyby),
 - b) środki przechowywania kosztowności (kasety, szafy, kasy, skarbcce),
 - c) środki transportowania kosztowności (samochody, urządzenia, przedmioty);
- elektroniczne urządzenia i systemy:
 - a) alarmowe SA (detektory, bariery), sygnalizacji pożaru, zagrożeń, specjalne,
 - b) wspomagające (kontrola i sterowanie dostępem SKD, podgląd i rejestracja sytuacji, dozór telewizji przemysłowej CCTV z wykryciem intruza),
 - c) przekazywania informacji o zagrożeniach do służb interwencyjnych (monitoring);
- fizyczne:
 - a) dozór i ochrona fizyczna oraz ochrona interwencyjna przez patrole i załogi porządkowe – sprawdzenie uprawnień do przebywania w obiekcie, wezwanie do opuszczenia, ujęcie osób stwarzających bezpośrednie zagrożenia i przekazanie ich policji; przymus bezpośredni – obezwładnienie, kajdanki, paralizatory, broń gazowa; użycie broni – odparcie zamachu, niepodporządkowanie się na wezwanie natychmiastowego porzucenia broni lub innego niebezpiecznego narzędzia;
 - b) zorganizowane wsparcie pracowników obiektu w ramach samoobrony;
 - c) interwencja policji i instytucji państwowych.

Funkcjonowanie ochrony obrazuje triada na rys. 1.3.

W odniesieniu do środków ochrony obowiązuje zasada, że żaden pojedynczy środek ochrony nie zapewni optymalnego poziomu bezpieczeństwa oraz że nie ma uniwersalnego środka zabezpieczenia, który zagwarantowałby optymalny poziom ochrony.

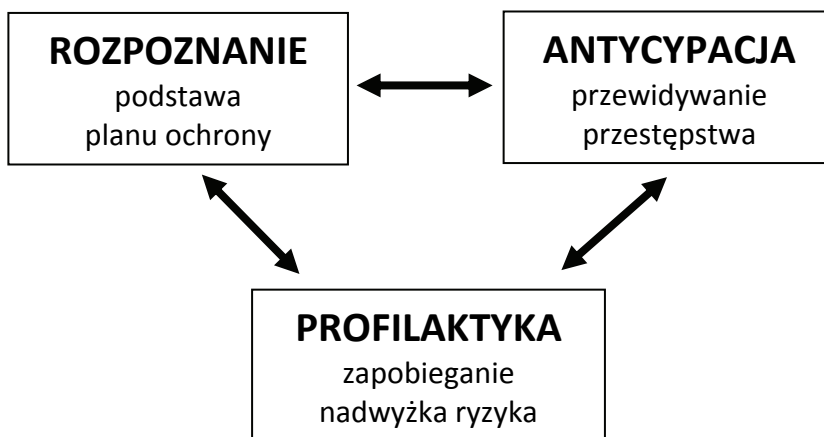
Funkcjonowanie ochrony jest oceniane następująco:

- działania organizacyjne – 80% skuteczności,
- zabezpieczenia architektoniczno-budowlane – 16% skuteczności,
- zabezpieczenia elektroniczne – 4% skuteczności.

Stopień bezpieczeństwa jest wyznaczany przez najniższą klasę środka ochrony. Obowiązuje reguła, że o sile łańcucha decyduje najsłabsze ogniwo, a najsłabszym ogniwem ochrony jest człowiek.

Zagrożenia (ochronę) klasyfikuje się według następujących kryteriów:

- treści – co jest przedmiotem zagrożenia,
- przestrzeni – jaki jest zasięg terytorialny zagrożenia,
- czasu – czy zagrożenie jest krótko- czy długotrwałe,
- ważności – czy zagrożone są podstawowe interesy,
- korelacji – jak zagrożenie oddziałuje na otoczenie.



Rys. 1.3. Triada ochrony

Celem ochrony jest przeciwstawienie się sprawcom zagrożeń wobec osób i mienia, udaremnianie możliwości powstania czynu bezprawnego lub ograniczenie jego skutków [Ustawa 1997]. Stawką w walce pomiędzy sprawcami a świadczącymi usługi zabezpieczająco-ochronne jest wolność od ryzyka lub niebezpieczeństwa, a skuteczność tej walki jest rozpatrywana również w funkcji czasu. Szanse, że sprawcy zamachu będą bezkarni, są bardzo duże, gdy zostanie on wykonany w możliwie krótkim czasie. Doświadczenia policji wskazują, że w zależności od rodzaju czynu zabronionego i warunków lokalnych czas jego wykonania zamyka się w przedziale od kilkudziesięciu sekund do około kilku minut. Sprawcy czynów bezprawnych działają zazwyczaj z zaskoczenia oraz wykonują zaplanowane zamiary, ściśle kontrolując czas.

Aby ochrona była skuteczna, należy zapewnić takie jej środki, które pozwolą odeprzeć bezpośredni zamach oraz w jego trakcie ująć sprawcę. Dlatego konieczne jest:

- opóźnienie dostępu sprawcy do dóbr chronionych (np. droga dojścia, solidna konstrukcja, wytrzymałe materiały),
- ograniczenie swobodnego poruszania się sprawcy w obiekcie (np. zamknięcie wewnętrznych pomieszczeń, wydzielenie stref użytkowania),
- udaremnienie lub ograniczenie możliwości dokonania zamachu przez sprawcę (np. skarbiec, skrytki depozytowe, zamki itp.),
- rozpoznanie naruszenia strefy ochronnej przez sprawcę zamachu i sygnalizowanie alarmu (np. czujki, bariery podczerwieni),
- wysyłanie sygnałów alarmu oraz ostrzeganie osób i instytucji odpowiedzialnych za ochronę obiektu i podejmowanie odpowiednich działań (np. systemy alarmowe, dozorowe, kontroli dostępu, telewizji przemysłowej).

Skuteczność środków ochrony jest zapewniona, gdy czas ujęcia sprawcy T_{us} jest co najwyżej równy sumie następujących czasów:

- pokonania przez sprawcę zabezpieczeń budowlano-mechanicznych obiektu i jego otoczenia (ogrodzenia) T_{bm} ,
- rozpoznania przyczyny naruszenia strefy chronionej i zasygnalizowania tego faktu przez instalację alarmową T_{sa} ,
- transmisji sygnału alarmu, a także ostrzegania osób i instytucji odpowiedzialnych za zajmowanie się ochroną i podejmowanie odpowiednich działań T_{td} ,
- wykonania zamiaru przez sprawcę (np. przygotowanie łupu do wyniesienia i wyniesienie, wywołanie pożaru, detonacja materiału wybuchowego) i do jego ucieczki, oddalenia się od obiektu na bezpieczną odległość T_{ru} .

$$T_{us} \leq T_i = T_{bm} + T_{sa} + T_{td} + T_{ru}$$

Opracowanie planu ochrony obiektu należy oprzeć na:

- opisie obiektu chronionego (rodzaj działalności, co się dzieje),
- analizie stanu bezpieczeństwa (patrz kolejny podrozdział 1.3),
- ocenie aktualnego stanu ochrony,
- danych dotyczących specjalistycznej uzbrojonej formacji ochronnej SUFO (stan etatowy, rodzaj i ilość uzbrojenia, zabezpieczenie broni),
- istniejącym zabezpieczeniu technicznym – integracji systemów,
- zasadach organizacji i sprawowania ochrony fizycznej i technicznej (zabezpieczenie, posterunki, instrukcje, procedury).

1.3. Ramowa procedura badania stanu bezpieczeństwa obiektu oraz określania środków ochrony osób i mienia

1.3.1. Etap I. Analiza i ocena warunków powstawania potencjalnych zagrożeń przestępnych w obiekcie

Nowicki [2002] wyróżnia trzy etapy ramowej procedury badania stanu bezpieczeństwa obiektu oraz określania środków ochrony osób i mienia. Prezentuje ją na przykładzie przedsiębiorstwa dostarczającego energię elektryczną.

Na pierwszym etapie ustala się i ocenia potencjalne i rzeczywiste zagrożenia przestępne w obiekcie, które wynikają z wykonywanych w nim zadań i pełnionych przez niego funkcji, oraz wskazuje dalszy zakres procedury badania bezpieczeństwa.

Po pierwsze, należy ustalić cele, zadania i funkcje związane z tym obiektem oraz opracować funkcjonalną topografię obiektu. Ustalenia te należy udokumentować w odniesieniu do poszczególnych elementów obiektu (budynków, ich poszczególnych pomieszczeń, miejsc itp.) w postaci zestawienia przedstawiającego: elementy obiektu i ich funkcje opisane maksymalnie szczegółowo (z piwnicami, strycharzami, ciągami komunikacyjnymi, miejscami przyległymi itp.) na podstawie wizji lokalnej obiektu.

Jeśli przykładowo badany obiekt jest przedsiębiorstwem użyteczności publicznej, które ma na bieżąco i nieprzerwanie zaopatrywać gospodarkę narodową i ludność w energię elektryczną, to jego działalność gospodarcza i struktura organizacyjna (struktura komórek organizacyjnych, ich wyposażenie w urządzenia i środki, określone zadania) są podporządkowane temu podstawowemu zadaniu. Temu też zadaniu powinien być podporządkowany system zabezpieczenia i ochrony zakładu przed czynami zabronionymi. Dlatego w szeroko rozumianej działalności przedsiębiorstwa można wyodrębnić następujące funkcje, pełnione przez poszczególne komórki organizacyjne w określonych miejscach i czasie:

- produkcja: wytwarzanie energii elektrycznej, energii cieplnej w skojarzeniu z energią elektryczną, produkcja uboczna na bazie produktów powstających w wyniku wytwarzania energii elektrycznej;
- utrzymanie ruchu: wszelkiego rodzaju usługi, w tym działalność remontowa mająca na celu zapewnienie ciągłości produkcji i zagwarantowanie efektywnego wykorzystania zdolności produkcyjnej;
- gospodarka materiałowa i magazynowa: ogół działań związanych z przechowywaniem dóbr materialnych i dostarczaniem ich do poszczególnych komórek organizacyjnych celem zapewnienia ciągłej, niezakłóconej działalności przedsiębiorstwa;
- transport: ogół działań pozwalających na wiązanie poszczególnych elementów produkcji i usług na rzecz produkcji i gospodarki materiałowej;
- łączność: rozumiana jako zagwarantowanie wymiany informacji z wykorzystaniem specjalistycznych urządzeń i środków;
- gospodarka finansowa, w tym działalność kasy i punktów płatniczych w ramach systemu kasowo-pięięznego;
- system informacyjny: zbiór wiadomości o obiekcie gromadzonych i przetwarzanych dzięki technice komputerowej;
- system ochrony przeciwpożarowej i alarmowy;
- system zabezpieczeń socjalnych, w tym związanych z zapewnieniem bezpieczeństwa i higieny pracy.

Po drugie, należy dokonać rozpoznania warunków powstawania zagrożeń przestępnych. W tym celu ustala się i dokumentuje w odniesieniu do obiektu jako całości wszystkie rodzaje potencjalnych zagrożeń przestępnych, które wynikają z wykonywanych w nim poszczególnych zadań i pełnionych funkcji. Sporządza się zestawienie zagrożeń przestępnych z punktu widzenia chronionych dóbr.

Po trzecie, należy opracować topografię potencjalnych zagrożeń przestępnych obiektu. W tym celu ustala się i dokumentuje w odniesieniu do poszczególnych elementów obiektu (budynków, ich pomieszczeń, miejsc itp.) wszystkie rodzaje potencjalnych, najbardziej prawdopodobnych zagrożeń przestępnych, które wynikają z wykonywanych zadań i pełnionych funkcji. Sporządza się maksymalnie szczegółowy opis elementów obiektu z uwzględnieniem piwnic,

strychów, ciągów komunikacyjnych, miejsc przyległych itp. oraz zagrożeń przestępnych związanych z elementami budynku.

Po czwarte, należy opracować listy rankingowe miejsc zagrożonych czynami zabronionymi. Listy te powinny obrazować stopień potencjalnego zagrożenia poszczególnych obiektów oraz wyróżnionych w nich elementów określonymi rodzajami zagrożeń. W miarę potrzeby obiekty i elementy należy podzielić na grupy zagrożenia, np. szczególnego, umiarkowanego oraz braku zagrożenia – wydzielić strefy obiektu o zróżnicowanym zagrożeniu.

Po piąte, należy spisać wnioski z I etapu badań. W szczególności należy wskazać:

- stopień zagrożenia obiektu i jego poszczególnych elementów określony na podstawie danych zebranych w toku czynności wykonanych w podanych powyżej czterech krokach,
- dane o rzeczywistych zagrożeniach przestępnych, które zdołano zebrać w toku dotychczasowych czynności,
- które obiekty lub ich elementy należy poddać szczegółowej ocenie w dalszych badaniach z uwagi na fakt ich zagrożenia i jakie to są zagrożenia,
- które zagrożenia – jako najbardziej prawdopodobne – powinny być dodatkowo zbadane przez specjalistów bezpieczeństwa pożarowego, chemicznego, epidemiologicznego i innych.

1.3.2. Etap II. Analiza i ocena okoliczności sprzyjających powstawaniu zagrożeń przestępnych

Na tym etapie ustala się, jakie okoliczności sprzyjają powstawaniu zagrożeń przestępnych w obiekcie lub miejscu, gdzie występują tzw. słabe punkty, ocenia się, jaki jest poziom ryzyka wystąpienia określonych zagrożeń przestępnych – w przypadku ich zwielokrotnienia – w poszczególnych obiektach i ich elementach, a także opracowuje się wnioski do dalszych badań.

Po pierwsze, należy dokonać ogólnego rozpoznania czynników sprzyjających powstawaniu i potęgowaniu zagrożeń przestępnych. Sporządzić spis czynników sprzyjających powstawaniu zagrożeń przestępnych oraz połączyć je w odpowiednie grupy.

Po drugie, należy opracować czynnikową topografię obiektu. W tym celu należy ustalić i udokumentować w odniesieniu do poszczególnych elementów obiektu (budynków, ich pomieszczeń, miejsc itp.) czynniki sprzyjające powstawaniu zagrożeń przestępnych, a także ocenić ich wpływ za pomocą określeń: „ujemny” i „dodatni”. Należy się tutaj odnosić do grup i rodzajów czynników wskazanych w pierwszym kroku tego etapu. Następnie należy sporządzić w maksymalnie szczegółowym opisie zestawienie elementów obiektu z uwzględnieniem piwnic, strychów, ciągów komunikacyjnych, miejsc przyległych itp. oraz skojarzyć z elementami obiektu, a także przygotować listy uwag i wnio-

sków dokumentujące własne szczegółowe spostrzeżenia, a także sugestie zamykającego badania o związku określonego czynnika z zagrożeniami przestępnymi. W zapiskach tych powinny być odnotowane zarówno pozytywne zjawiska (np. zmniejszanie lub neutralizacja zagrożenia), jak i negatywne oraz wskazywane sposoby i środki neutralizacji zagrożeń przestępnych.

Po trzecie, należy maksymalnie szczegółowo przeanalizować tzw. słabe punkty z uwzględnieniem piwnic, strychów, ciągów komunikacyjnych, miejsc przyległych itp. Należy tutaj wykorzystać rezultaty uzyskane w drugim kroku II etapu. W tym celu należy przygotować plan sytuacyjny obiektu oraz rysunki przekrojów budowlanych obiektów z wprowadzonymi znakami umownymi (jednolitymi dla całego zespołu badawczego) wskazującymi czynniki sprzyjające powstawaniu zagrożeń przestępnych określonego rodzaju.

Po czwarte, należy przeanalizować poziom ryzyka wystąpienia zagrożeń przestępnych w określonych obiektach i miejscach oraz:

- uzupełnić listy rankingowe opracowane poprzednio (patrz: I etap, krok czwarty) o zbiorcze dane wynikające z analizy słabych punktów (patrz: II etap, krok trzeci),
- dokonać podziału obiektu i jego elementów na grupy (strefy) ryzyka wystąpienia zagrożenia, np. szczególnego, umiarkowanego oraz braku zagrożenia.

Po piąte, należy spisać wnioski z II etapu badań. W szczególności należy wskazać:

- w których obiektach i ich elementach należy zastosować szczególne sposoby i środki neutralizacji zagrożeń oraz jakie to są zagrożenia,
- które obiekty i ich elementy powinny być dodatkowo zbadane przez specjalistów bezpieczeństwa pożarowego, chemicznego, epidemiologicznego i innego.

1.3.3. Etap III. Analiza i ocena środków ochrony koniecznych do neutralizacji zagrożeń przestępnych

Na tym etapie określa się konieczne sposoby i środki neutralizacji zagrożeń przestępnych w poszczególnych obiektach i ich elementach. W pierwszym kroku należy opracować topografię sposobów i środków neutralizacji zagrożeń przestępnych przez przeanalizowanie i ustalenie – w odniesieniu do poszczególnych elementów obiektu (budynki, ich pomieszczenia, miejsca itp.) – jakie sposoby i środki są konieczne do neutralizacji zagrożeń przestępnych. W analizie tej należy się odnieść do grup i rodzajów czynników przyjętych w pierwszym kroku II etapu. Teraz należy je przekształcić w sposoby i środki neutralizacji zagrożeń. W tym celu należy sporządzić maksymalnie szczegółowy opis elementów obiektu z uwzględnieniem piwnic, strychów, ciągów komunikacyjnych, miejsc przyległych itp. oraz poszczególne sposoby i środki neutralizacji zagrożeń odnieść do elementów obiektu.

W drugim kroku przygotowuje się końcowe sprawozdanie z badań. Należy w nim opisać sposoby i środki konieczne do neutralizacji zagrożeń przestępnych, a w szczególności podać:

- w których obiektach i ich elementach należy zastosować określone sposoby i środki neutralizacji zagrożeń oraz jakie to są zagrożenia,
- które obiekty i ich elementy powinny być dodatkowo zbadane przez specjalistów bezpieczeństwa pożarowego, chemicznego, epidemiologicznego i innych.

W toku etapów I–III powstaje dokumentacja złożona z zestawień (najlepiej w formie tablic) i rysunków (rzuty i przekroje obiektu).

Dalej rozważania ograniczono do niebezpieczeństwa katastrofy po eksplozji materiałów wybuchowych, propagacji fali detonacyjnej, wytrzymałości i zniszczenia elementów konstrukcyjnych obiektu. Analiza bezpieczeństwa ma jednak zawsze charakter ogólny, a uwzględnienie różnorodnych zagrożeń pozwala dostrzec przenikające się różne elementy w zagadnieniu bezpieczeństwa obiektu budowlanego.

1.4. Inne zagadnienia związane z bezpieczeństwem obiektu

1.4.1. Zarządzanie ryzykiem w przedsiębiorstwie

Aspekty bezpieczeństwa muszą być uwzględnione w zarządzaniu nieruchomościami i infrastrukturą podczas:

- wyboru lokalizacji firmy,
- planowania urbanistycznego terenu,
- projektowania architektoniczno-budowlanego i w trakcie budowy,
- podczas eksploatacji budynku przez zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego firmy, w tym rezerwowych źródeł zasilania, użytkowania zintegrowanych instalacji dostępu, dozoru, alarmu, monitoringu i innych (elementy budynku inteligentnego) oraz w zarządzaniu transportem i logistyką,
- prognozowania potrzeb.

Zarządzanie ryzykiem w przedsiębiorstwie leży w gestii rady nadzorczej, zarządu i innych pracowników. Uwzględnia się je przy ustalaniu strategii i obejmuje nim całe przedsiębiorstwo. Projektowane jest w celu identyfikacji potencjalnych zagrożeń, które mogą dotknąć jednostkę. Pozwala zyskać racjonalną pewność co do osiągnięcia celów jednostki.

1.4.2. Zarządzanie energią

Ogrzewanie, klimatyzacja, oświetlenie, zasilanie prądem elektrycznym, zarządzanie systemami informatycznymi, systemami BMS i ich bezpieczeństwo stanowią elementy infrastruktury wewnętrznej, technicznego wyposażenia bu-

dynku zaliczane do kategorii komfortu pomieszczeń, ściśle związanych z poczuciem bezpieczeństwa użytkowników lub mieszkańców.

1.4.3. Zintegrowane zarządzanie bezpieczeństwem obiektu

Połączenie funkcjonowania wszystkich instalacji ochrony i zabezpieczeń, w tym kontroli dostępu, telewizji przemysłowej, alarmu i powiadamiania, wielokrotnia korzyści ich stosowania w porównaniu z użytkowaniem poszczególnych systemów. Zintegrowany system wydajniej obsługuje instalację telewizji przemysłowej: uruchamia kamery nadzorujące i monitorujące, przekazuje obrazy na ekrany centralnego systemu kontroli poza chroniony obiekt, do służb zapewnienia bezpieczeństwa. System rozproszony o obiektowej logice sterowania, wspomagany wielofunkcyjnymi urządzeniami i czujkami podłączonymi do centralnej tablicy sterowania, jest nieprzerwanym, samokontrolującym się układem o wysokim wskaźniku niezawodności nadzoru nad obiektem. Wzrastający stopień nasycenia rozwiązaniami elektronicznymi i mikroprocesorowymi, w tym wspomaganiem programistycznym, wielu sprzętów sprawia, że budynek staje się budynkiem inteligentnym [Niezabitowska 2005; Dubrawski 2012]. Personel techniczny sprawujący nadzór nad obiektem może się komunikować i wykorzystywać informacje pochodzące z różnych instalacji, może bezpośrednio lub zdalnie (na duże odległości) korzystać z serwisowego centrum zarządzania dzięki coraz prostszym urządzeniom sterującym. Integracja obejmuje sprzęt, wyposażenie techniczne, służby i procedury bezpieczeństwa.

1.4.4. Monitoring strukturalny

Coraz powszechniejsze rozbudowane rozwiązania techniczne pozwalają służbom technicznym (i narzucają im) prowadzić ciągłą i dynamiczną obserwację obiektów inżynierskich (takich jak np. zapory, tunele, mosty, wysokie budynki) lub zjawisk naturalnych (takich jak np. erupcje wulkanów, trzęsienia ziemi, osuwanie i osiadanie gruntu, anomalie pogodowe i powiązane z nimi obciążenia wiatrem, wodą, śniegiem i ogniem) oraz obszarów zagrożonych. Głównym zadaniem monitoringu jest prowadzenie cyklicznych pomiarów przemieszczeń i odkształceń w punktach położonych wewnątrz lub dookoła badanych obiektów. Rejestracja, gromadzenie, weryfikacja poprawności i dokładności, szyfrowanie, przesyłanie, filtrowanie i analizowanie danych pomiarowych są nieodłącznie związane z prowadzeniem obserwacji. Często niezbędna jest natychmiastowa analiza rezultatów i poinformowanie odpowiednich służb, gdy tylko przemieszczenia bądź odkształcenia przekraczają wartości dopuszczalne. Komunikaty o przekroczeniu stanów nominalnych i krytycznych (alarmowych), ale także o usterkach systemu, spadku napięcia, włamaniu i utracie łączności z czujnikami pomiarowymi są wysyłane do centrum monitoringu oraz odbierane za pomocą urządzeń mobilnych przez personel dyżurny.

Pewność i wiarygodność przekazywanych sygnałów z danymi oraz zdublowanie i różnicowanie mediów (radiowe, układy mieszane) w systemie łączności mają pierwszorzędne znaczenie dla skutecznego funkcjonowania monitoringu (zbieranie informacji, podjęcie odpowiednich decyzji, ocena skuteczności i sprawności zmian, działania interwencyjne i wyjątkowe – alarmowe). Monitoring strukturalny pomaga obecnie zidentyfikować słabe punkty konstrukcji, wymagające wzmocnienia, większej ochrony lub istotnej modernizacji.

1.4.5. Audyt bezpieczeństwa przedsiębiorstwa

Celem audytu bezpieczeństwa przedsiębiorstwa jest:

- ocena najsłabszych ogniw ochrony fizycznej i technicznej,
- stwierdzenie, jakich środków ochrony najbardziej brakuje,
- przygotowanie osób i firmy do ochrony przed zagrożeniami,
- kontrola stanu ochrony w warunkach zaskoczenia,
- określenie kluczowych wskaźników bezpieczeństwa.

1.4.6. Stan kryzysu

Oprócz dotychczas rozważanego zamierzonego niebezpieczeństwa dokonanego przez przestępcę stan bezpieczeństwa lub niebezpieczeństwa jest analizowany także w różnych sferach życia społecznego. Stan bezpieczeństwa lub stan kryzysowy spowodowany zaistnieniem niebezpieczeństwa jest określany np. dla bezpieczeństwa międzynarodowego, publicznego, regionalnego, ekonomicznego, energetycznego, jądrowego, teleinformatycznego. Najczęściej z tymi pojęciami spotykamy się wtedy, gdy zaistnieje sytuacja kryzysowa, potwierdzająca deficyt bezpieczeństwa i konieczność działania ratunkowego.

Stan kryzysu określony w ustawie [2010] jako niedostatek stanu bezpieczeństwa wynika z zagrożeń ze strony sił przyrody lub skutków działań człowieka. Są to:

- katastrofy i kataklizmy (trzęsienie ziemi, osunięcie, erupcja),
- klęski żywiołowe (powodzie, pożary, opady, wichry, huragany, tornada),
- epidemie (ludzie i zwierzęta),
- bezpośrednie zagrożenie militarne – wojna,
- terroryzm,
- przestępczość zorganizowana i korupcja,
- wypadki drogowe, kolejowe, lotnicze i morskie,
- awarie energetyczne, wodno-kanalizacyjne, gazowe,
- wycieki, zanieczyszczenia i skażenia chemiczne,
- toksyczne zmiany w środowisku,
- ataki na systemy informatyczne,

- nielegalni imigranci i emigranci, konflikty narodowościowe,
- formalne i nieformalne organizacje dążące do agresji lub anarchii.

Zarządzanie sytuacją kryzysową stanowi odrębną, istotną część bezpieczeństwa państwowego. Jest oparte na oddzielnych regulacjach prawnych. Specjalnie powołane służby państwowe wykonują zadania w czterech podstawowych, wyraźnie wyodrębnionych fazach:

1. Zapobieganie kryzysowi – profilaktyka. Polega ona na zapewnieniu spokojnego, zrównoważonego rozwoju (akceptowanego poziomu bezpieczeństwa) przez przygotowanie i utrzymanie wiarygodnych i adekwatnych do zagrożeń możliwości reagowania w przypadku wystąpienia klęski, katastrofy i/lub innego zdarzenia powodującego lub mogącego spowodować sytuację kryzysową. Działania powinny być zorganizowane w układzie funkcjonalnym i terytorialnym na wszystkich szczeblach władzy, odpowiednio do zaistniałej sytuacji. Do zmniejszenia ryzyka, ograniczenia skutków lub wykluczenia wystąpienia stanu kryzysu przyczyniają się:

- ocena zagrożeń i wrażliwości,
- analiza prawdopodobieństwa wystąpienia katastrofy,
- świadomość społeczeństwa i powszechna edukacja (szkolenia wojskowe, cywilne, lokalne, ćwiczenia procedur postępowania na wypadek określonego zdarzenia),
- utrzymanie i wykorzystanie zasobów (infrastruktura techniczna: transport, komunikacja, sprzęt do usuwania skutków katastrof i przywracania funkcji, żywność, środki medyczne, źródła energii, ochrona),
- odpowiedzialność, przywództwo i współdziałanie (struktura wojskowa i cywilna kadry – dyrektor i pułkownik),
- system zachęt i restrykcji finansowych (zwolnienia podatkowe, kary za brak stanu gotowości),
- badania stosowane i transfer technologii w celu podnoszenia stanu bezpieczeństwa.

2. Przygotowanie do sytuacji kryzysowej. Gotowość cywilna ma na celu wyłącznie sprostanie sytuacjom wykraczającym poza akceptowany poziom bezpieczeństwa. Rutynowymi sprawami zajmują się służby dyżurne, skutecznie administrowane w sytuacji przekroczenia akceptowanego poziomu bezpieczeństwa. Ich zadania są następujące:

- określenie współdziałania centrum zarządzania kryzysowego ze służbami,
- powołanie sztabu kryzysowego, określenie struktury, funkcji i zadań,
- sprawdzanie wyposażenia, sprawności sprzętu, środków zapobiegania, ratowania i usuwania skutków kryzysu oraz uzupełnienie ich stanu,
- określenie systemu utrzymania łączności telefonicznej i internetowej, informowania o stanie kryzysu, poznanie scenariuszy i procedur postępowania oraz zaznajamianie z nimi wszystkich pracowników i kontrahentów,

- opracowanie planu próbnych alarmów i ćwiczeń ewakuacyjnych, przygotowanie instrukcji, tablic i oznakowania na wypadek stanu kryzysu,
- wdrażanie i utrzymywanie zdolności reagowania,
- zagwarantowanie prowadzenia procesów społecznych i gospodarczych w sytuacji zagrożenia na akceptowanym poziomie,
- zabezpieczenie racjonalnej i terminowej pomocy ofiarom klęsk i katastrof,
- zapewnienie wsparcia sektora cywilnego w zakresie czynności militarnych i obrony cywilnej podczas działań zbrojnych,
- racjonalne wykorzystanie zasobów ludzkich, finansowych i materiałowych,
- przygotowanie sprawnych struktur do działania w sytuacji kryzysowej,
- opracowanie planów ewakuacji z podaniem dwóch miejsc spotkań: bliskiego (np. pożar) i dalekiego (w sytuacji braku możliwości dodatkowego powrotu do domu),
- podawanie numerów telefonów informacyjnych (0 800250250, 0 694444222) i alarmowych (112, 997, 998, 999),
- opracowanie planu kontaktowania się – wyznaczenie osoby spoza domu jako dodatkowego punktu kontaktu.

3. Reagowanie na symptomy i działanie w stanie kryzysu. Wykonywanie zadań w zakresie gotowości cywilnej powinno się odznaczać takimi cechami, jak:

- elastyczność – gotowość sprostania każdemu zagrożeniu i we wszystkich warunkach, należy zachować margines dla inwencji operacyjnej;
- funkcjonalność – wykorzystanie zasobów w dowolnej sytuacji na odcinku cywilnym i militarnym, wymaga to ciągłego uaktualniania dokumentacji i doskonalenia zarządzania kryzysowego;
- efektywność – umożliwia prowadzenie racjonalnych działań przy minimalnych kosztach ludzkich i materiałowych w stosunku do efektów;
- adekwatność – przestrzeganie wymogu angażowania zasobów i kompetencji odpowiednich do określonej sytuacji, gwarantuje to reagowanie na najniższym koniecznym poziomie;
- powszechność – włączenie do systemu władz na wszystkich poziomach, instytucji, organizacji i podmiotów gospodarczych oraz wszystkich mieszkańców, w tym mieszkańców innych państw na stałe zamieszkujących w Polsce;
- profesjonalizm personelu – wysoki poziom wiedzy specjalistycznej, doświadczenie, zdolności mediacyjne itd. – gwarantuje wywiązywanie się z obowiązków, zapewnia akceptację społeczeństwa, wiarygodność i autorytet;
- akceptacja społeczna – występuje wówczas, gdy są efekty profesjonalnych działań; brak profesjonalizmu i ignorancja w połączeniu z arogancją są przyczyną braku akceptacji społecznej i podwyższają ryzyko;
- wiarygodność – zapewnia akceptację społeczną, ma szczególne znaczenie na poziomie lokalnym, decyduje o skuteczności systemu;

- gotowość – stan osiągany w permanentnej działalności celowej, ciągle modyfikowany i doskonalony w miarę rozwoju możliwości i umiejętności;
- zdolność do improwizacji – umiejętność gwarantująca wykonanie ciągu uporządkowanych działań w zależności od sytuacji; z doświadczenia wynika, że im niższy szczebel organizacyjny, tym więcej improwizacji;
- przejrzystość – wykonywanie swoich zadań i niewkraczanie w kompetencje innych; zapewnienie poprawności działania we wszystkich warunkach bez konieczności sprawowania ciągłego nadzoru;
- odpowiedzialność funkcjonalna – odpowiedzialność organów i instytucji w zakresie sprawowanych funkcji; poszczególne dziedziny działalności (funkcje) są podporządkowane władzy publicznej, niezależnie od poziomu zarządzania; odpowiedzialność odnosi się do wszystkich funkcji cywilnych istotnych dla gotowości cywilnej;
- odpowiedzialność terytorialna – wykonywanie zadań gotowości cywilnej na poziomie jednostek administracyjnych: gminy, powiatu, województwa, zróżnicowane w zależności od szczebla zarządzania i sytuacji (pokój, wojna); odpowiedzialność odnosi się do wszystkich funkcji na wszystkich poziomach władzy.

Prymat jednego elementu nad innym, jednej zasady nad innymi jest w systemie niedopuszczalny. Wszystkie elementy są równie ważne, wzajemnie się przenikają i uzupełniają. Każdy element odgrywa w systemie ważną, jemu przypisaną rolę. Reagowanie na zagrożenia polega na podjęciu akcji ratowniczej, dostarczeniu pomocy poszkodowanym, ograniczeniu strat i szkód wtórnych.

Podejmuje się następujące działania:

- ogłasza sytuację nadzwyczajną – kryzys na własnym terenie,
- powołuje podstawowe zintegrowane służby ratownicze,
- ewakuje i prowizorycznie kwateruje oraz zaopatruje ludność,
- przestrzega dyscypliny postępowania i zapewnia obieg informacji,
- przewiduje skutki podejmowanych decyzji,
- unika nieprzemyślanych działań,
- prognozuje rozwój wydarzeń,
- zapewnia odpowiednią liczbę ekspertów,
- uwzględnia implikacje prawne decyzji,
- gwarantuje funkcjonowanie instytucji publicznych,
- współpracuje z ratunkowymi służbami publicznymi (straż, pogotowie),
- przekazuje na czas kryzysu pracowników, sprzęt i środki do dyspozycji organów władzy publicznej przejmującej odpowiedzialność i kompetencje.

4. Odbudowa stanu bezpieczeństwa po ustaniu zagrożeń. Po ustaniu zagrożenia przywraca się stan systemów sprzed kryzysu albo czyni go bardziej bezpiecznym. W tym celu podejmuje się następujące działania:

- krótkoterminowe: przywraca się systemy niezbędne do życia oraz minimalne standardy operacyjne,

- długoterminowe: całkowicie odbudowuje się obszar dotknięty kryzysem, dąży się do ograniczenia zagrożenia kolejną katastrofą, wprowadza nowe rozwiązania, materiały, technologie.

Literatura

- Budynek inteligentny* (2005), red. E. Niezabitowska, t. 1 i 2, Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- Crouch S., Shaftoe H.H., Fleming R. (2001), *Bezpieczne mieszkanie, dom i osiedle*, Arkady, Warszawa.
- Dubrawski A. (2012), „Inteligentny” to znaczy przyjazny użytkownikowi i ekologiczny, *Inteligentny Budynek*, 2 (5), s. 58–61.
- Nowicki Z.T. (2002), *Badanie bezpieczeństwa obiektu*, wyd. 2, Warszawa, Centrum Kształcenia i Doskonalenia Kadr.
- PN-EN 1127: 2011 *Atmosfery wybuchowe. Zapobieganie wybuchowi i ochrona przed wybuchem*.
- PN-EN 60079: 2002 *Urządzenia elektryczne w przestrzeniach zagrożonych wybuchem, 10: Klasyfikacja przestrzeni zagrożonych wybuchem*.
- PN-EN 14383: 2008 *Zapobieganie przestępczości. Planowanie urbanistyczne i projektowanie budynków*.
- Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, Dz.U., nr 75, poz. 690.
- Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 21 kwietnia 2006 r. w sprawie ochrony przeciwpożarowej budynków, innych obiektów budowlanych i terenów, Dz.U., nr 80, poz. 563.
- Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 16 czerwca 2003 r. w sprawie uzgadniania projektu budowlanego pod względem ochrony przeciwpożarowej, Dz.U., nr 121, poz. 1137.
- Ustawa z dnia 24 sierpnia 1991 r. o ochronie przeciwpożarowej, Dz.U., nr 147, poz. 1229.
- Ustawa z dnia 6 czerwca 1997 r. Kodeks karny, Dz.U., nr 88, poz. 553.
- Ustawa z dnia 22 sierpnia 1997 r. o ochronie osób i mienia, Dz.U., nr 114, poz. 740.
- Ustawa z dnia 29 października 2010 r. o zmianie ustawy o zarządzaniu kryzysowym, Dz.U., nr 240, poz. 1600.
- Ustawa z dnia 15 grudnia 2011 r. o zmianie ustawy o ochronie przeciwpożarowej oraz niektórych innych ustaw, Dz.U., nr 288, poz. 1688.

2. Rozwiązania urbanistyczne i architektoniczne a zagrożenie terrorystyczne

2.1. Wprowadzenie

Zygmunt Bauman w wywiadzie przeprowadzonym przez Jacka Żakowskiego dla „Polityki” (21.12.2004) w taki sposób wyraził się o bezpieczeństwie, które w pewnym sensie powinno nam zapewnić państwo: „[Państwo] *Chce zdobyć naszą wdzięczność, gdy nie wybuchnie bomba, gdy nie zostaniemy pobici przez chuliganów lub gdy żebracy zostaną usunięci z ulicy. Żółty alarm. Pomarańczowy alarm. Czerwony. Uff, udało się, zamach udaremniono! Im mniej security, tym więcej podniecenia i szumu wokół safety. Można w ten sposób zmylić czujność obywateli, odwrócić naszą uwagę od zaniedbań lub bezsilności władzy. Do roku 2001 działalność terrorystyczna, a tym samym zagrożenia z niej płynące, były traktowane jako element towarzyszący ludzkiej egzystencji w zurbanizowanym świecie*”¹.

Ataki terrorystyczne były także wcześniej, ale nie na taką skalę. Działania terrorystyczne spowodowały, że współczesna urbanistyka zaczyna nawiązywać w pewnym sensie do okresu średniowiecza, czyli do czasu, w którym czynnik obronny i ochrona były wartościami najważniejszymi. Kompozycja przestrzeni miejskiej, której zadaniem jest tworzenie bezpiecznego schronienia, staje się pewnego rodzaju bramą; nie zawsze rzeczywistą, w wielu przypadkach także mentalną. Relacje w przestrzeniach współczesnego miasta w wielu przypadkach wynikają z ludzkich zachowań, których celem jest dążenie do obniżenia poziomu zagrożenia. Bardzo często definiowane zagrożenie odnosi się do przestrzeni publicznych, czyli obszarów najsilniej zurbanizowanych.

W połowie lat 60. XX wieku Jane Jacobs (1916-2006) zwróciła uwagę na kwestię bezpieczeństwa w środowisku miejskim. W swojej przełomowej pracy, zatytułowanej *The death and life of great American cities*, napisała, że „*ulica miasta przystosowana do obsługi niezidentyfikowanych przechodniów musi mieć trzy główne zalety. Po pierwsze, musi istnieć czytelna granica pomiędzy tym, co jest przestrzenią publiczną, a tym, co jest przestrzenią prywatną. Po drugie, musi charakteryzować ją tzw. zasada oczu skierowanych na ulicę, to znaczy, że mieszkańcy kontrolują, co się na niej dzieje w ciągu dnia. Budynki znajdujące się przy niej muszą być zorientowane fasadami do głównego ciągu komunikacyjnego. Po trzecie, chodnik musi być przestrzenią, w której jest ciągły ruch przechodniów*” [Jacobs 1961, tłum. A.N.].

¹ Do najbardziej znanych, spektakularnych aktów terrorystycznych można zaliczyć m.in. zamach na izraelskich sportowców na olimpiadzie w Monachium w roku 1972, zniszczenie ambasady USA w Bejrucie w 1983 roku, atak terrorystyczny na World Trade Center w Nowym Yorku w 2001 roku.

Autorka koncentruje się na idei utrzymania krytycznego natężenia ruchu pieszego w danym obszarze miasta. Wysuwa hipotezę, że zurbanizowane przestrzenie miasta są bezpieczniejsze niż miejsca niezabudowane, które „odwracają się od ulicy”. Przestrzenie, w których poruszają się ludzie, są bardziej interesujące do oglądania i przebywania w nich. Jacobs opisała swoje zanurzenie się w tę przestrzeń jako widz. Ten akt działań urbanistycznych nazwała „baletem chodnika”. Taki sposób interpretowania przestrzeni miasta oraz jej dostępności był charakterystyczny dla wczesnych lat 60. XX wieku. Wprowadzenie ruchu do przestrzeni miejskiej przyczyniło się do stworzenia doskonałej sytuacji, w której terrorysta może wykorzystać przestrzeń publiczną jako miejsce ataku. Współczesne założenia przestrzenne oraz ich kompozycja w wielu wypadkach nie spełniają podstawowych zasad bezpieczeństwa, mających na celu zabezpieczenie przed atakami terrorystycznymi czy przeciwdziałanie im (brak kontroli dostępu, monitoringu itp.).

Po ataku terrorystycznym 11 września 2001 roku na budynki World Trade Center w Nowym Yorku urbanistyka i architektura stanęły przed nowymi wyzwaniami – zabezpieczenia zdrowia i życia ludzi. Współczesna walka z terroryzmem wpływa na sposób projektowania urbanistycznego i architektonicznego. W ostatnich latach na świecie podjęto wiele działań w tym zakresie. W Polsce natomiast działania związane z ochroną antyterrorystyczną przestrzeni miast są prowadzone wybiórczo i odbiegają niestety od tendencji światowych.

W Polsce planowanie przestrzenne i urbanistyka są oparte na ustawie o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym. Ustawa ta ma zapewnić utrzymanie ładu przestrzennego na terenach zurbanizowanych i niezurbanizowanych. Nie ma natomiast zapisów, które odnosiłyby się do ochrony przed atakami terrorystycznymi. Oczywiście, w ramach procesu planowania istnieje możliwość (ograniczona) wprowadzenia pewnych zapisów, które przyczyniłyby się do poprawy bezpieczeństwa, przede wszystkim na terenach publicznych – placach, skwerach, a także zapisów dotyczących bezpieczeństwa infrastruktury technicznej, przede wszystkim dróg publicznych i wewnętrznych. Istnieje także możliwość opracowania zasad ochrony przed atakami terrorystycznymi na terenach objętych miejscowym planem zagospodarowania przestrzennego lub studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego. Obecnie należałoby jednak stworzyć odpowiednie, kompleksowe zapisy o zabezpieczeniu przed atakami terrorystycznymi, ponieważ ich brak może w przyszłości powodować liczne problemy natury projektowej i prawnej.

Podstawę działań architektonicznych stanowi ustawa Prawo budowlane. Również w tym akcie prawnym nie ma jednoznacznych odniesień do ochrony antyterrorystycznej. Są podane jedynie warunki techniczne, które mają zabezpieczyć ludzi i ich mienie przed skutkami działań przestępczych lub przyczynić się do ich ochrony. Także w tej ustawie ze względu na zagrożenie terrorystyczne należałoby wprowadzić zapisy o zagospodarowaniu działki budowlanej i warunkach technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie.

2.2. Układy urbanistyczne i elementy architektury zewnętrznej utrudniające dostęp terrorystom

Miasto na przestrzeni lat ulegało licznym przemianom i transformacjom wynikającym ze zmieniających się teorii i doktryn urbanistycznych. Według zasad przyjętych w projektowaniu urbanistycznym w modelu współczesnego miasta można wyróżnić cztery podstawowe struktury przestrzenne narażone na działania terrorystyczne: strukturę przestrzenną całego miasta, strukturę przestrzenną poszczególnych dzielnic, strukturę kwartałów tworzących dzielnice oraz pojedynczy budynek mieszkalny. We wszystkich wymienionych elementach kompozycji miejskiej istnieje możliwość zastosowania różnych środków ochrony, które mogą się przyczynić do zapewnienia bezpieczeństwa przebywającym w nim ludziom.

Działaniem, które może pomóc w ochronie struktury przestrzennej miasta i jego dzielnic, jest ograniczenie dostępu do poszczególnych części miasta. Wiąże się to z lokalizowaniem wzdłuż głównych ulic punktów kontrolnych, których nadrzędną rolą jest monitorowanie pojazdów. Elementem, który może mieć znaczenie kompozycyjne, jest projektowanie ulic w taki sposób, aby zminimalizować prędkość poruszających się po nich pojazdów. Działaniami tymi można objąć także dzielnice historyczne. Oczywiście w wielu przypadkach działania ochronne przed atakami terrorystycznymi stają się przyczynkiem do dyskusji nad jakością i formą elementów ochronnych.

Działania skierowane na zminimalizowanie zagrożeń w strukturze przestrzennej poszczególnych kwartałów zabudowy można scharakteryzować jako wytyczne tworzenia siatki urbanistycznej miasta na wzór tarczy. W ramach „tarczy urbanistycznej” powinny być sformułowane ściśle zasady np. projektowania ulic okalających kwartały. Zasady te będą tworzyły wzór postępowania. Zgodnie z tym wzorem nowe ulice okalające kwartały, podobnie jak system ochrony całego miasta, powinny być wyposażone w elementy minimalizujące prędkość poruszających się po nich pojazdów. W celu bezpośredniej ochrony kwartału można zastosować bardziej radykalne środki. Na przykład kwartał można otoczyć różnego rodzaju betonowymi lub stalowymi słupkami uniemożliwiającymi bezpośredni dostęp do jego wnętrza, np. pojazdu wypełnionego materiałami wybuchowymi (rys. 2.1 i 2.2). Należałoby jednak rozważyć rzeczywiste skutki takiego radykalnego działania dla kompozycji. Jeżeli ulegnie się psychozie strachu, która pojawiła się po roku 2001, zaczną być obudowywane i chronione w ten sposób wszystkie kwartały, a nie o to chodzi w projektowaniu uwzględniającym zagrożenia terrorystyczne. Dostęp do danego kwartału można monitorować lub regulować za pomocą np. ozdobnych kwietników, elementów ochronnych – ławek, latarni, słupków przed wejściami, które w rzeczywistości są punktami ograniczającymi możliwość penetracji wnętrza.

Ostatni poziom ochrony, który również ma znaczenie kompozycyjne, to ograniczenie dostępu do poszczególnych budynków tworzących strukturę prze-

strzeżną kwartału (rys. 2.3). Może do tego służyć np. system kontroli wejść i wyjść. Tworzenie ograniczonej strefy wejściowej do budynku musi się wiązać ze zmniejszeniem jej znaczenia kompozycyjnego, co może mieć wpływ na całość kompozycji kwartału.



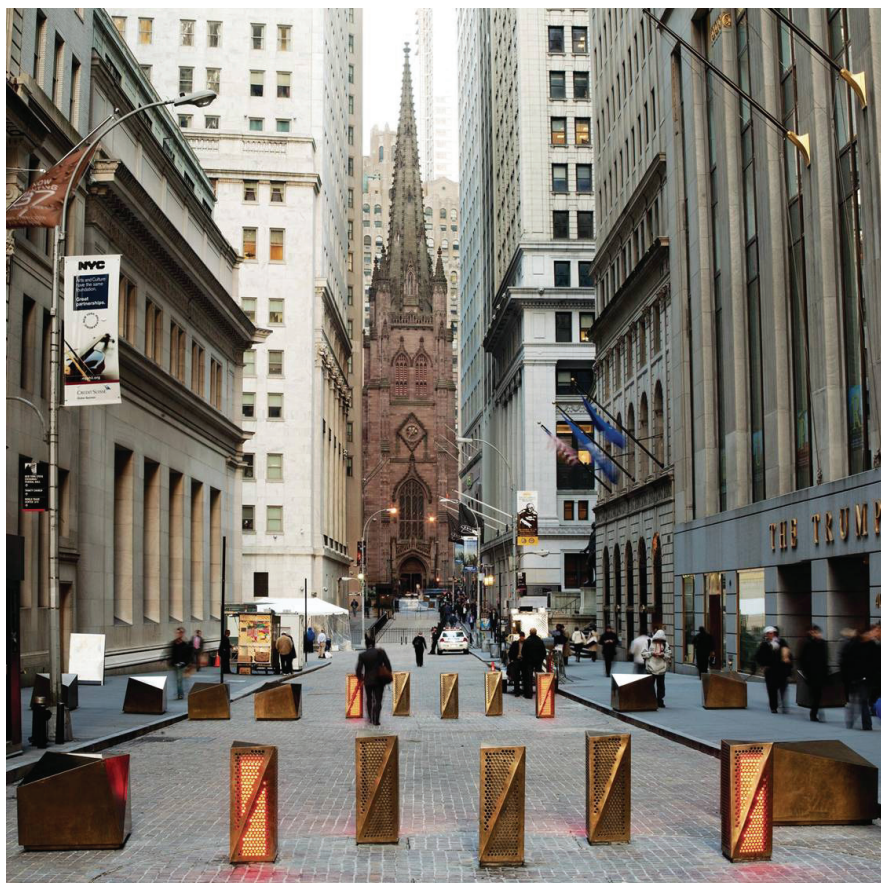
Rys. 2.1. Wprowadzenie zróżnicowania posadzki oraz betonowych siedzisk jako elementów utrudniających dostęp do budynku na przykładzie Apple Store przy piątej alei w Nowym Jorku (fot. A. Nadolny)

Kształtowanie kompozycyjne każdej z wymienionych przestrzeni niesie różnego rodzaju wyzwania. Działania terrorystyczne wywołały pewnego rodzaju psychozę miejską. Forma urbanistyczna takich przestrzeni miasta, jak plac, ulica czy kwartał zabudowy powinna wynikać przede wszystkim z funkcji, jaką pełnią te elementy w strukturze przestrzennej. Bezpieczeństwo powinno być czynnikiem ważnym, ale nie jedynym w kształtowaniu ich formy. Kompozycja uwzględniająca bezpieczeństwo urbanistyki powinna nawiązywać do wzorców, które sprawdziły się w przeszłości. Formy urbanistyczne powinny być zwarte, czytelne i jednoznacznie zdefiniowane w strukturze przestrzennej miasta. Należy zwrócić uwagę na czynniki ochronne, ale urbanistyka powinna być prosta w swoim wyrazie i jednocześnie funkcjonalna.



Rys. 2.2. Przykład zabezpieczenia budynku szkockiego parlamentu za pomocą betonowych słupków ograniczających dostęp do niego oraz uniemożliwiających zaparkowanie pojazdu (źródło: <http://www.flickr.com/photos/itmpa/4858061246/sizes/o/in/photostream>)

Wymienione wyżej środki ochrony mogą być przydatne w tworzeniu nowych założeń przestrzennych, ale także w rewitalizacji obszarów śródmiejskich. Ważne jest, by wprowadzane bariery przestrzenne i strefy dostępu nie kolidowały z podstawową funkcją układów przestrzennych. Ta szczególnego rodzaju nowa urbanistyka, wynikająca z działań ochronnych, powinna się wpisywać w krajobraz kulturowy poszczególnych miast i regionów. Współczesne miasto jest pewnego rodzaju zbiorem działań planistycznych ostatnich stuleci. Należy więc na nie patrzeć jak na układankę, której wzór powstawał w wyniku różnych interwencji i działań przestrzennych. Nowe wyzwania wynikające z walki z terroryzmem wymuszają inne spojrzenie na działania projektowe skierowane w przyszłość, ale z wyraźnym zaakcentowaniem przeszłości.

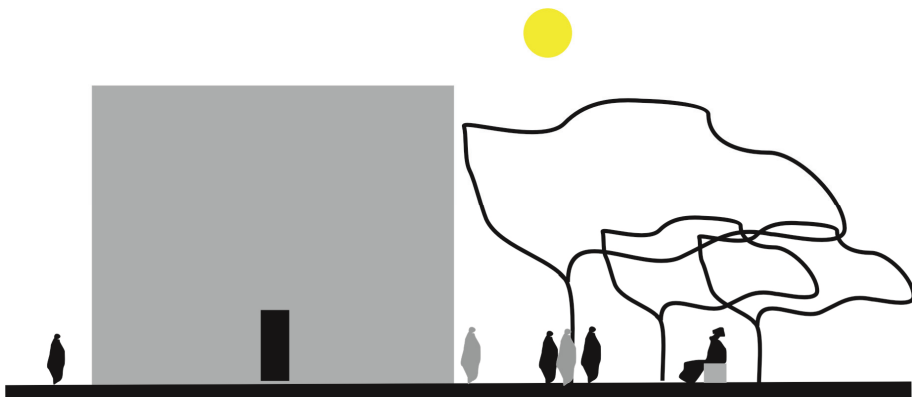


Rys. 2.3. Turntable Vehicle Barrier (Rogers Marvel Architects) – przykład zastosowania słupków ochronnych w Nowym Jorku (źródło: www.rogersmarvel.com)

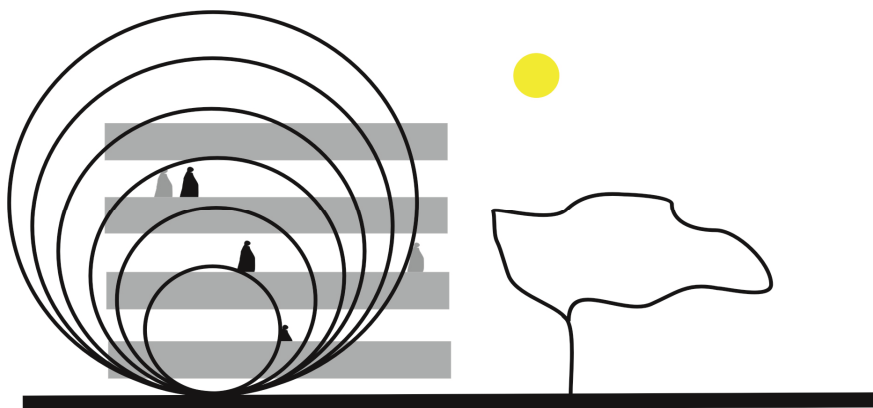
2.3. Potrzeba uwzględnienia zagrożenia już na etapie tworzenia koncepcji architektonicznej obiektu

Zagrożenie budynku atakiem terrorystycznym istnieje zawsze. W zależności jednak od rodzaju budynku na etapie koncepcji inna jest sfera działań związanych z jego ochroną. Nie można zaprojektować budynku całkowicie odpornego na działania terrorystyczne. Musiałby to być betonowy kontener (rys. 2.4).

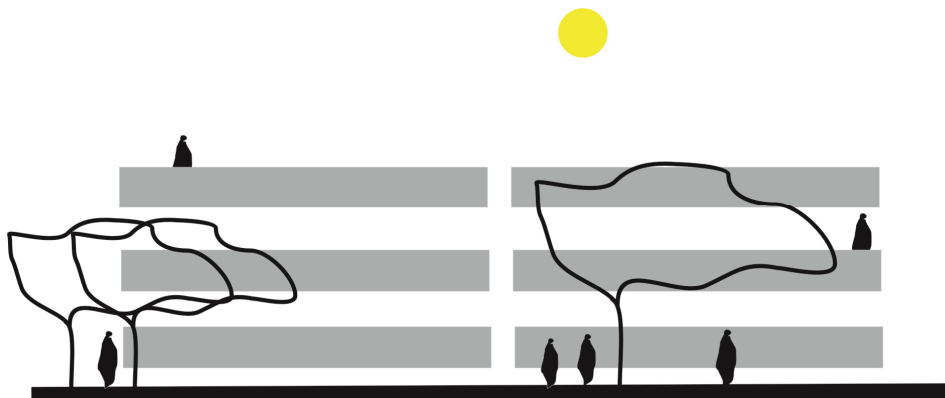
Tworząc koncepcję architektoniczną budynku odpornego na działania terrorystyczne, w pierwszej kolejności należy zwrócić uwagę na kształtowanie okien, gdyż ten element budynku – tak ważny w twórczości architektonicznej – jest najbardziej narażony na działanie siły wybuchu w jego pierwszej fazie. Elewację budynku należałoby kształtować w taki sposób, aby fala uderzeniowa swobodnie przedostawała się przez budynek bez naruszenia jego konstrukcji (rys. 2.5).



Rys. 2.4. Graficzna prezentacja prawie bezpiecznego budynku – betonowa kostka bez okien umieszczona w krajobrazie miasta (rys. A. Nadolny)



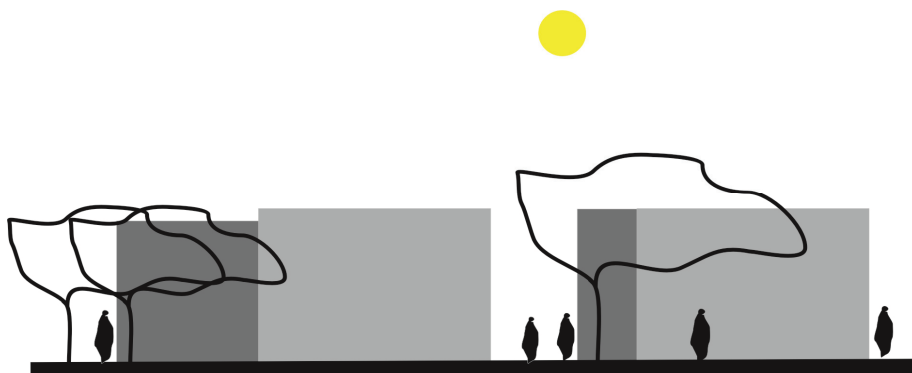
Rys. 2.5. Graficzna prezentacja rozchodzenia się fali wybuchu w budynku o takim rozmieszczeniu okien, że rozprzestrzenia się ona bez naruszenia stabilności konstrukcji (rys. A. Nadolny)



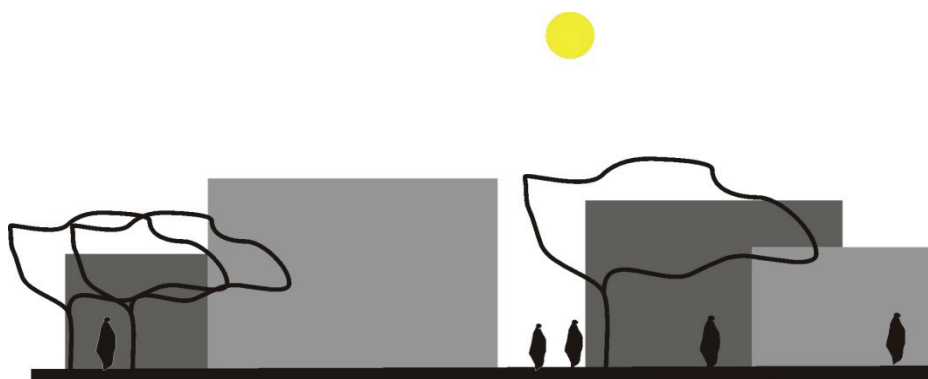
Rys. 2.6. Zwarta forma budynku ułatwiająca jego ochronę przed skutkami ataku terrorystycznego (rys. A. Nadolny)



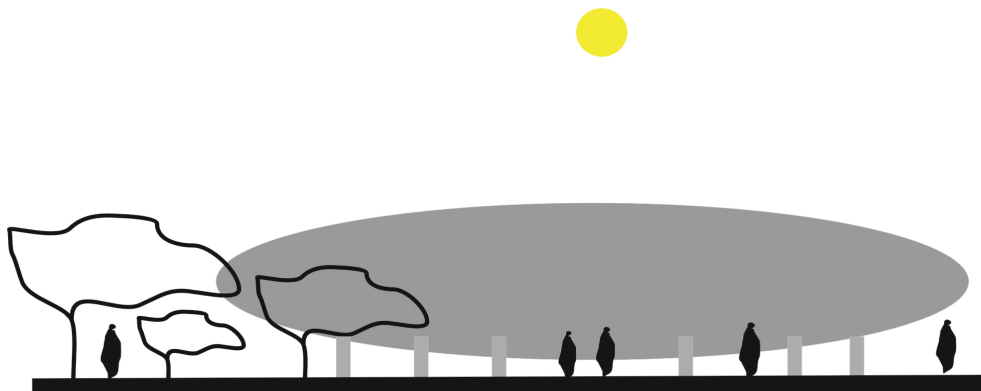
Rys. 2.7. Rozproszona forma budynku utrudniająca jego ochronę przed skutkami ataku terrorystycznego (rys. A. Nadolny)



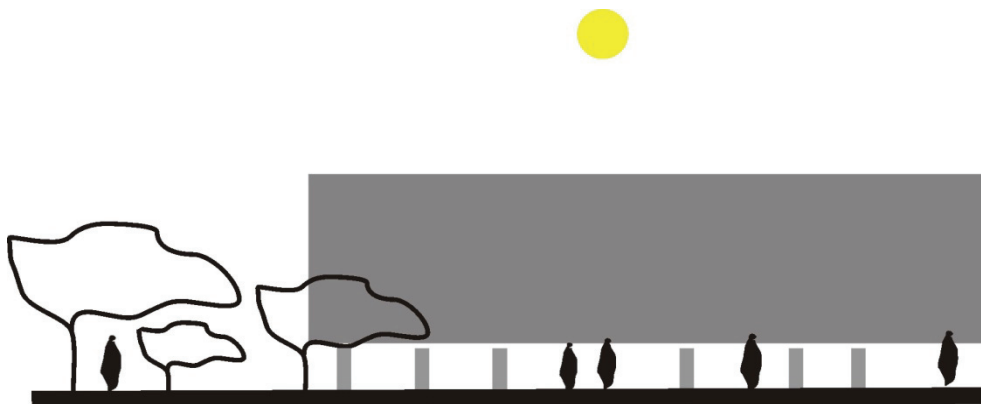
Rys. 2.8. Zwarta forma zespołu budynków ustawionych pod kątem ułatwiająca ich ochronę przed skutkami ataku terrorystycznego (rys. A. Nadolny)



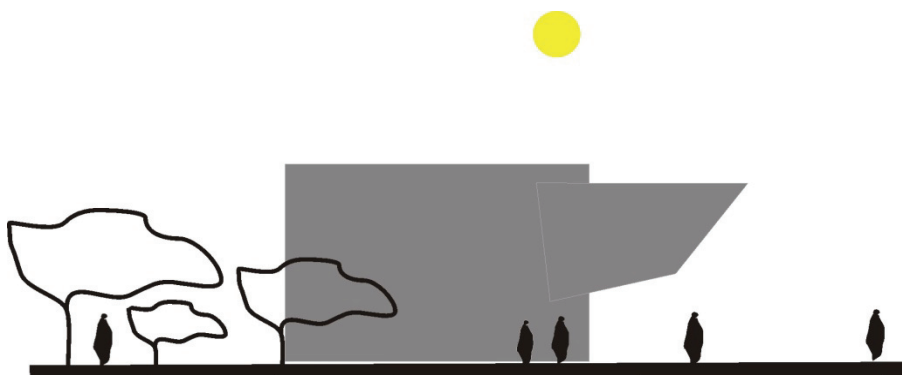
Rys. 2.9. Rozproszona forma zespołu budynków ustawionych pod kątem utrudniająca ich ochronę przed skutkami ataku terrorystycznego (rys. A. Nadolny)



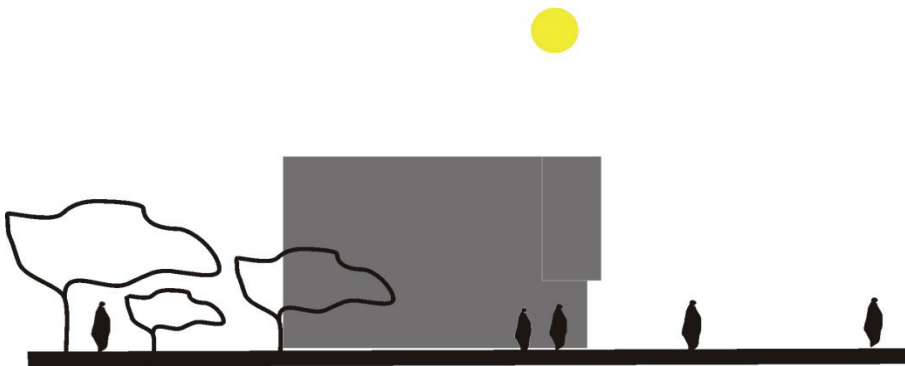
Rys. 2.10. Oplywowa forma budynku ułatwiająca jego ochronę przed skutkami ataku terrorystycznego (rys. A. Nadolny)



Rys. 2.11. Geometryczna forma budynku utrudniająca jego ochronę przed skutkami ataku terrorystycznego (rys. A. Nadolny)



Rys. 2.12. Nadwieszane fragmenty budynków utrudniająca jego ochronę przed skutkami ataku terrorystycznego (rys. A. Nadolny)



Rys. 2.13. Nadwieszane fragmenty budynków zastąpione płytkimi wykuszami (rys. A. Nadolny)



Rys. 2.14. Forma budynku wtopiona w krajobraz (rys. A. Nadolny)



Rys. 2.15. Niewykorzystane w formie budynku zróżnicowane ukształtowanie terenu zwiększające bezpieczeństwo podczas ataku terrorystycznego (rys. A. Nadolny)

Należy także pamiętać, że ze względu na ochronę budynku niebagatelne znaczenie ma jego forma. W tym przypadku należy się skupić na tworzeniu

obiektów o bryłach zwartych (rys. 2.6–2.9) – geometrycznych lub obłych (rys. 2.10 i 2.11) – i zwartych ustawionych pod kątem. Tak lubiane przez architektów wybujale formy mogą być niewłaściwe ze względu na zapewnienie bezpieczeństwa.

Jak kształtować bryłę budynku narażonego na atak terrorystyczny, aby był bezpieczny? Przed wszystkim należy zrezygnować z jej rozczłonkowania, tworzenia elementów wiszących lub nadwieszonych (rys. 2.12 i 2.13), gdyż mogą stanowić zagrożenie dla ludzi w chwili wybuchu. W ostatnich latach obserwuje się powrót architektów do tworzenia budynków wkomponowanych w krajobraz, niskich, współgrających z naturą. Ten kierunek projektowania jest zgodny z zasadą, że budynek wkomponowany w krajobraz (rys. 2.14–2.16), ukryty w ziemi jest mniej narażony na działanie i skutki wybuchu.

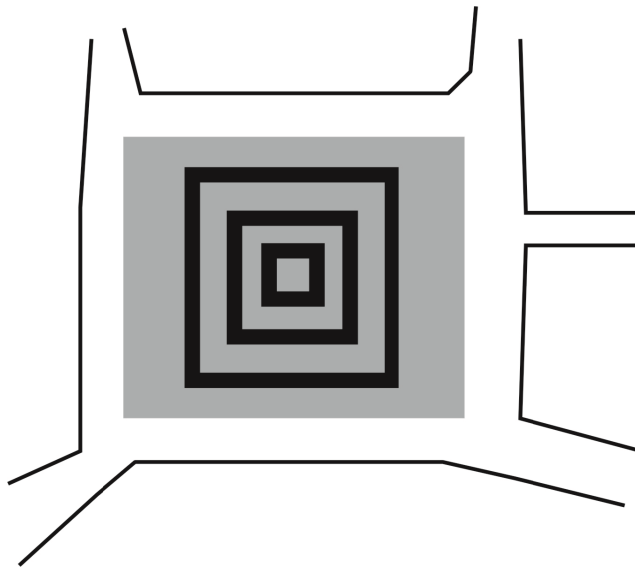
Kształtując układ przestrzenny nowo projektowanego budynku, należy brać także pod uwagę strefowanie wnętrza. Pomieszczenia szczególnie ważne powinny być umieszczone jak najdalej od zewnętrznych ścian (rys. 2.18).



Rys. 2.16. Przykład wkomponowania budynku przy Wimberggasse w Wiedniu w ukształtowanie terenu oraz użycia betonu jako materiału konstrukcyjnego (fot. A. Nadolny)



Rys. 2.17. Zwarta bryła budynków parlamentu niemieckiego w Berlinie uzupełniona betonową zaporą utrudniającą dostęp do nich (fot. A. Nadolny)

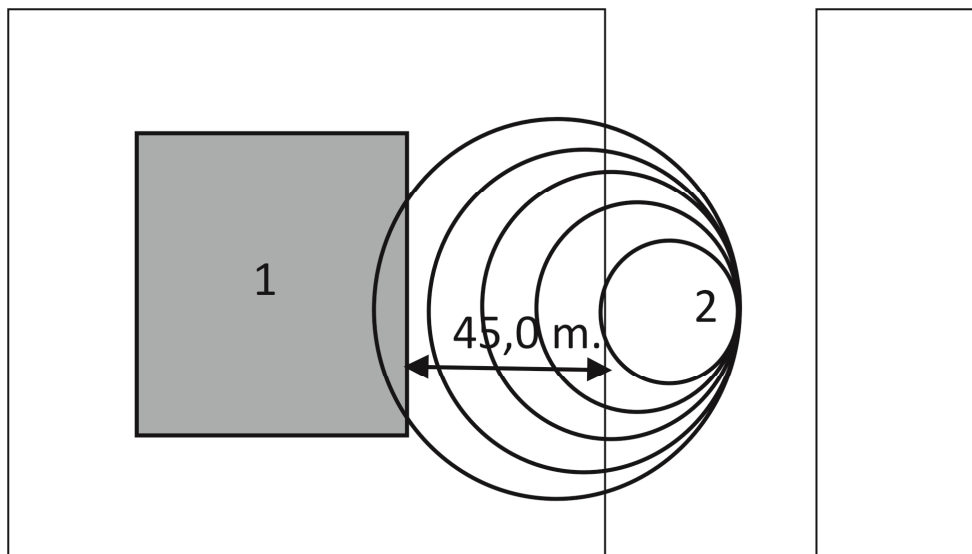


Rys. 2.18. Diagram ukazujący rozmieszczenie pomieszczeń we wnętrzu budynku – pomieszczenia najważniejsze z punktu widzenia funkcjonowania obiektu znajdują się w samym środku (rys. A. Nadolny)

Architektura budynku nie zapewni bezpieczeństwa przebywającym w nim ludziom, jeżeli nie będą skoordynowane działania osób zajmujących się jego ochroną. Z tej przyczyny oprócz uwzględnienia przedstawionego zbioru wytycznych projektowania należy opracować system monitorowania budynku oraz ścisłą kontrolę wejść i wyjść.

2.4. Podstawowe zasady projektowania nowych obiektów

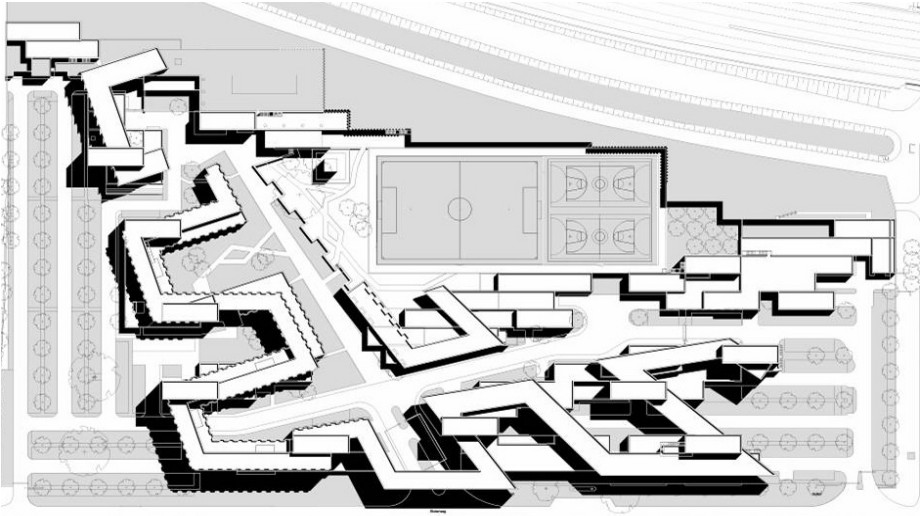
Podstawowe zasady projektowania bezpiecznych nowych obiektów zależą od ich przeznaczenia, od tego, czy będzie to np. zespół budynków publicznych czy małe osiedle mieszkaniowe. Jak wspomniano wcześniej, układ urbanistyczny powinien się charakteryzować dużą zwartością. Według standardów amerykańskich odległość budynku od drogi powinna wynosić 45 m (rys. 2.19).



Rys. 2.19. Usytuowanie budynku względem ulicy według standardów amerykańskich; 1 – budynek, 2 – miejsce wybuchu (rys. A. Nadolny na podstawie FEMA 430, s. 3–7)

Ważnym etapem projektowania jest umieszczenie budynku w kontekście przestrzennym (rys. 2.20). W zależności od tego, czy budynek stanowi uzupełnienie istniejącej struktury przestrzennej miasta, czy jest samodzielnym obiektem (rys. 2.21), w różny sposób projektuje się strefy dostępu oraz monitoring zewnętrzny i wewnętrzny. W rozpatrywaniu zagadnień ochrony budynku przed atakami terrorystycznymi są pomocne wytyczne amerykańskie, na których oparto przytoczone niżej uwagi.

a)



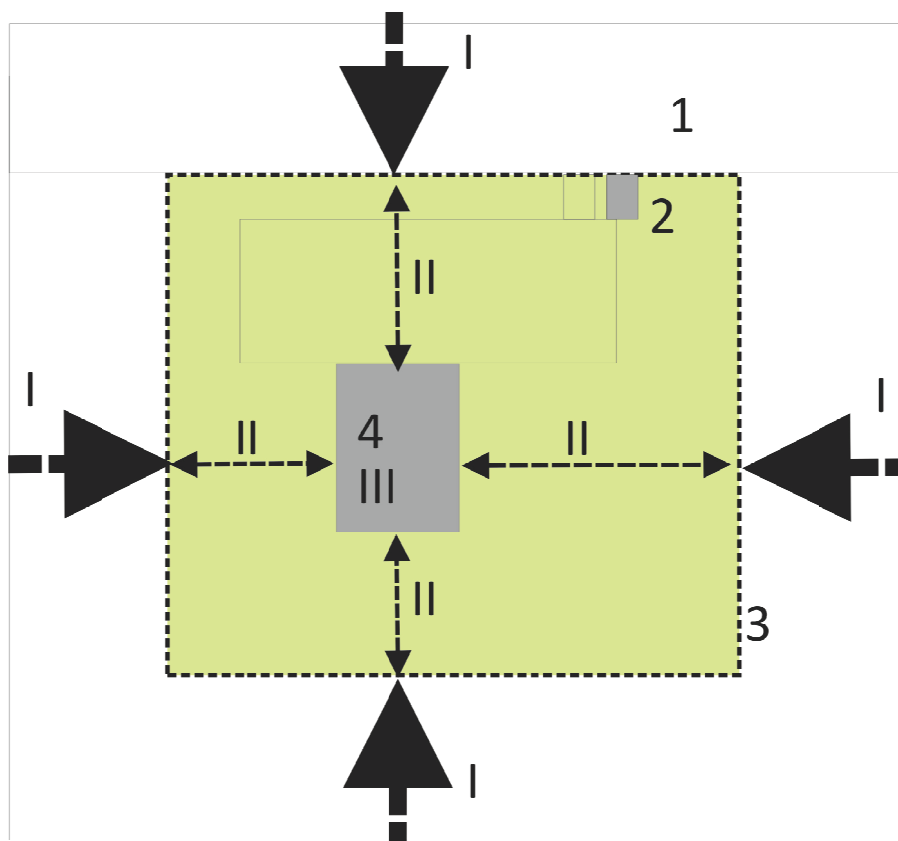
b)



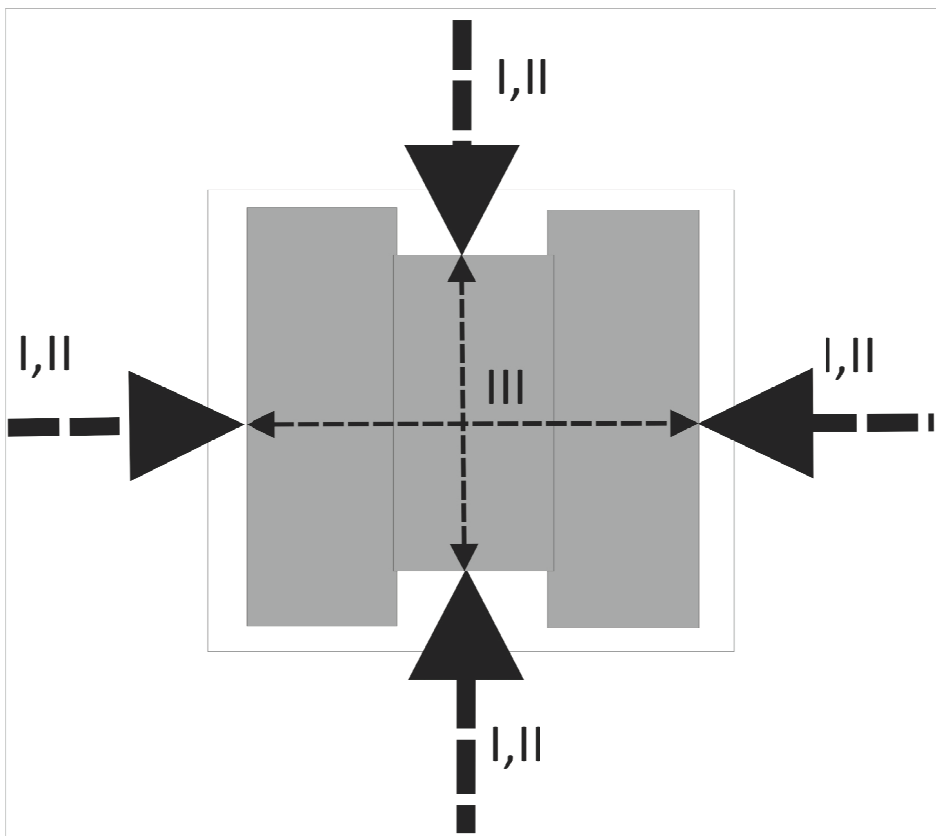
Rys. 2.20. Zwarta zabudowa Royal Military Police District Schiphol (Holandia) autorstwa Zvi Heckera (źródło: archiwum Zvi Hecker Berlin): a) koncepcja, b) makieta

Inaczej wygląda schemat zabezpieczenia budynku położonego w ścisłym centrum. W tym przypadku nie można zapewnić zarówno odpowiedniego „odejścia”, jak i poszczególnych stref bezpieczeństwa. Propozycję podziału stref bezpieczeństwa pokazano na rys. 2.22 i 2.23.

Projektując nowy budynek, nie należy zapomnieć o takich istotnych elementach ochronnych, jak płoty, ogrodzenia i bramy z punktami kontrolnymi (rys. 2.24 i 2.25). Aby ogrodzenie otaczające budynek pełniło funkcję ochronną, musi mieć wysokość 2,40 m. Konstrukcja ogrodzenia nie powinna być monolityczna, np. betonowa, kamienna czy ceglana. Zaleca się konstruowanie ogrodzenia z prętów metalowych – powinno być ażurowe, gdyż ułatwia to monitorowanie terenu [Jasiński 2010, s. 85].



Rys. 2.21. Schemat ukazujący strefy ochronne budynku usytuowanego na działce; I – strefa zewnętrzna, II – strefa na terenie działki, III – strefa wewnętrzna budynku; 1 – droga do budynku i działki, 2 – punkt kontrolny wjazdów i wyjazdów, 3 – ogrodzenie, 4 – budynek podlegający ochronie (rys. A. Nadolny na podstawie FEMA 430, s. 3–3)

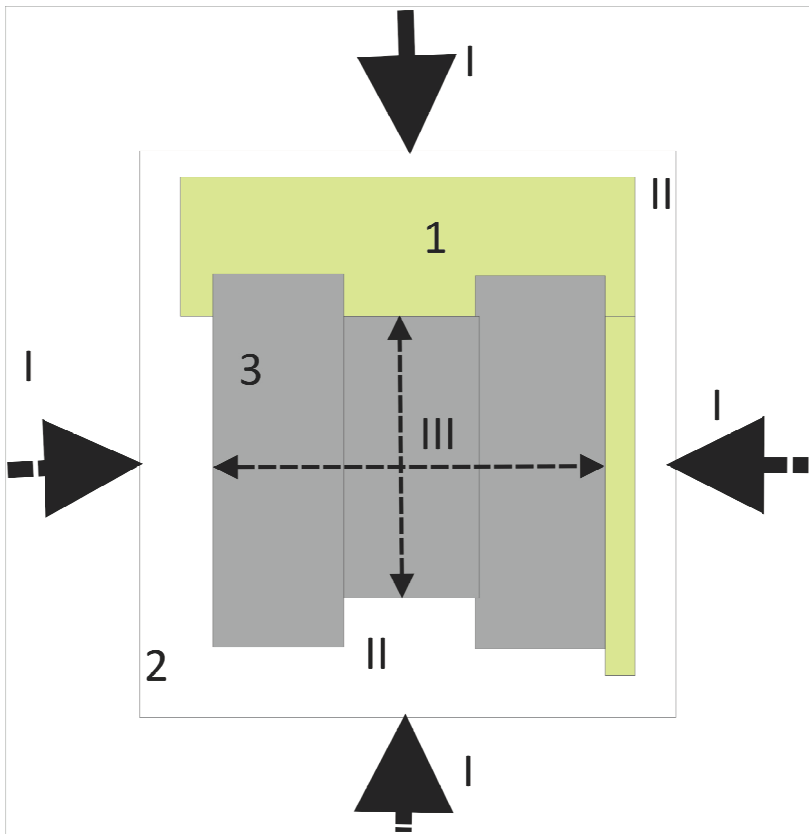


Rys. 2.22. Schemat ukazujący strefy ochronne budynku (kolor szary) usytuowanego w śródmieściu; I i II – strefa zewnętrzna, III – strefa wewnętrzna budynku (rys. A. Nadolny na podstawie FEMA 430, s. 6–3)

Elementem zagospodarowania obszaru wokół nowej inwestycji jest bardzo często zieleń. Zaleca się, aby wokół obiektu chronionego nie była ona nadmiernie wybudowana (rys. 2.26). Zieleń ma być dodatkiem do architektury, a nie elementem dominującym. Nie powinna zasłaniać wejść i wyjść z budynku. Powinno się także unikać sadzenia drzew w pobliżu elewacji, gdyż może to ułatwić podłożenie ładunku wybuchowego.

Strefa parkingowa chronionego budynku również powinna być zaprojektowana zgodnie z określonymi zasadami. Według amerykańskich badań parkingów nie wolno lokalizować w bezpośrednim sąsiedztwie budynków, np. przed wejściem, gdyż jest to najbardziej prawdopodobne miejsce podłożenia ładunku wybuchowego. Konstrukcja chronionych budynków powinna być przede wszystkim żelbetowa. Ten rodzaj materiału jest wskazywany w wielu badaniach jako najbezpieczniejszy i najskuteczniejszy. Do ważnych elementów nowo projektowanego budynku należą niewątpliwie okna i elewacje. Zaleca się, aby ele-

wacje były wykonane z profili stalowych lub aluminiowych. Szkło będące jej uzupełnieniem powinno być wzmocnione lub wykonane z klejonych arkuszy poliwęglanowych.



Rys. 2.23. Schemat ukazujący strefy ochronne budynku usytuowanego w śródmieściu, otoczonego chodnikiem i terenami zielonymi; I – strefa zewnętrzna, II – strefa na chodniku otaczającym budynek, III – strefa wewnętrzna budynku; 1 – tereny zielone, 2 – chodnik otaczający budynek, 3 – budynek podlegający ochronie (rys. A. Nadolny na podstawie FEMA 430, s. 6–14)

Jak wykazały badania prowadzone w wielu ośrodkach światowych, celem działań terrorystycznych są przede wszystkim obiekty publiczne: biura, centra handlowe itp. Spośród objętych ochroną pasywną budynków publicznych najbardziej narażone na atak są obiekty handlowe (galerie i centra handlowe) oraz centra komunikacyjne (lotniska, dworce kolejowe), czyli obiekty, które obecnie są ważnymi elementami kształtowania i rozwoju miasta.



Rys. 2.24. Przykład zabezpieczenia budynku szkoły żydowskiej w Berlinie (autor projektu Zvi Hecker): kontrola dostępu, wprowadzenie od strony ulicy ażurowego ogrodzenia o wysokości ponad 2,40 m i system monitoringu – kamery (fot. A. Nadolny)



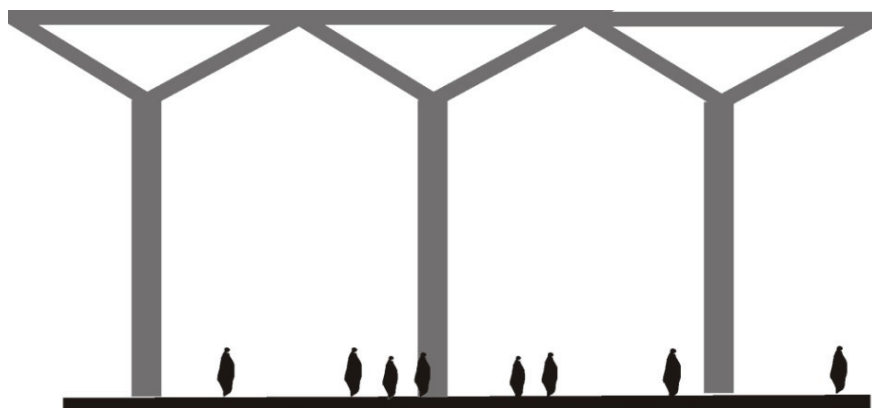
Rys. 2.25. Przykład zabezpieczenia budynku ambasady Królestwa Niderlandów w Berlinie (autor projektu Rem Koolhaas) za pomocą betonowych słupków ograniczających dostęp oraz uniemożliwiających zaparkowanie pojazdu (fot. A. Nadolny)



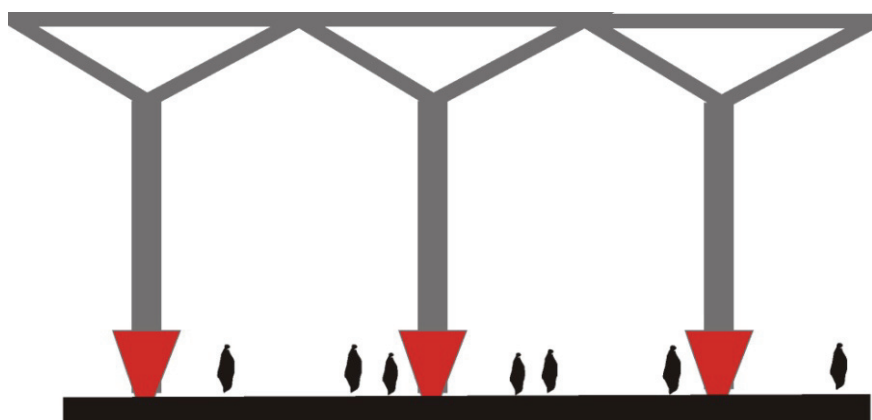
Rys. 2.26. Przykład niskiej zieleni przed budynkiem parlamentu w Berlinie (fot. A. Nadolny)



Rys. 2.27. Plac przed budynkiem parlamentu w Berlinie – pozbawiony zieleni, dopełniony betonowymi klockami ochronnymi (fot. A. Nadolny)



Rys. 2.28. Schemat konstrukcji pozbawionej ochrony, narażonej na podłożenie ładunku wybuchowego (rys. A. Nadolny)



Rys. 2.29. Schemat konstrukcji zabezpieczonej przed podłożeniem ładunku wybuchowego (rys. A. Nadolny)

W budynkach publicznych, w których elementy konstrukcji są widoczne, należy uniemożliwić dostęp do filarów, słupów czy kluczowych elementów konstrukcji (rys. 2.28). Elementy ochronne powinny się znajdować u podstawy podpór, do których dostęp powinien być ograniczony do odległości minimum 80 cm od ich środka (rys. 2.29).

2.5. Możliwości zwiększenia bezpieczeństwa istniejących obiektów za pomocą zabiegów architektonicznych

Są następujące możliwości zabezpieczenia istniejących budynków przed działaniami terrorystycznymi i ich skutkami:

- wymiana stolarki okiennej na spełniającą wymagania ochrony budynków,
- otoczenie budynków betonowymi zaporami uniemożliwiającymi dostęp,
- przebudowa głównego wejścia do budynku w taki sposób, aby były spełnione warunki bezpieczeństwa,
- wprowadzenie zintegrowanego systemu monitoringu,
- kontrola wejść do budynku i wyjść z niego (rys. 2.30),
- zabezpieczenie dostępu z zewnątrz do kluczowych instalacji w budynku,
- otoczenie budynku ażurowym ogrodzeniem o wysokości co najmniej 2,40 m,
- reorganizacja miejsc parkingowych – usunięcie miejsc parkingowych znajdujących się bezpośrednio przed budynkiem,
- usunięcie z posesji zieleni, która ogranicza widoczność,
- wzmocnienie konstrukcji budynku,
- ograniczenie dostępu z zewnątrz do kluczowych elementów konstrukcji budynków publicznych, centrów handlowych i innych.

Omówione środki ochrony mogą być wykorzystane podczas tworzenia nowych założeń przestrzennych, ale także podczas rewitalizacji obszarów śródmiejskich, przy czym wprowadzane bariery przestrzenne i strefy dostępu nie powinny kolidować z podstawową funkcją układów przestrzennych (rys. 2.31). Ta pewnego rodzaju nowa urbanistyka, wynikająca z działań ochronnych, powinna się także wpisywać w krajobraz kulturowy poszczególnych miast i regionów.

W kontekście współczesnej walki z terroryzmem oraz przedstawionych wytycznych projektowania można zaryzykować stwierdzenie, że pewne rozwiązania przestrzenne np. okresu modernizmu są błędne lub pozbawione sensu. W wyniku nadmiernego rozbudowania układów przestrzennych osiedli mieszkaniowych z wielkiej płyty lub unowocześnienia na siłę śródmieść wielu polskich miast powstały układy przestrzenne, które mogą się stać celem ataku terrorystycznego. Prowadząc liczne działania „naprawcze”, których celem była humanizacja urbanistyki modernistycznej, zapomniano o stworzeniu układów przestrzennych, które choćby częściowo uwzględniały prezentowane w tym tekście założenia.

Jedną z fundamentalnych zasad projektowania miast jest stworzenie formy doskonałej. Platon w swoim dziele pt. *Państwo* poruszył zagadnienie miasta-państwa jako formy przestrzennej, w której ludzie są pogrupowani w zależności od funkcji, jaką pełnią w społeczeństwie. Pisał o tym w następujący sposób:



Rys. 2.30. Przykład zabezpieczenia budynku ambasady Królestwa Niderlandów w Berlinie (autor projektu Rem Koolhaas) – kontrola wejść do budynku i wyjść z niego (fot. A. Nadolny)



Rys. 2.31. Przykład zabezpieczenia budynku ambasady Królestwa Niderlandów w Berlinie (autor projektu Rem Koolhaas) za pomocą betonowych słupków ograniczających dostęp i uniemożliwiających zaparkowanie pojazdu (fot. A. Nadolny)

„Do czego ktoś się urodził, do tej roboty trzeba każdą jednostkę przydzielić, tak żeby się każdy czymś jednym, co do niego należy zajmował i każdy był czymś jednym a nie większą liczbą jednostek” [Szacki 1981]. Taka forma regulacji przestrzeni miasta, będąca w pewnym sensie odzwierciedleniem państwa, miała wpłynąć na jego stabilność i jedność. Należy w tym miejscu dodać, że Platon w swoim idealnym mieście-państwie przewidywał drobiazgową kontrolę wszystkich przejawów życia społeczności miejskiej. Odmawiał jej jakichkolwiek praw do ekstrawagancji, która zagrażałaby łaadowi społecznemu. Może w tym sposobie zarządzania miastem tkwi odpowiedź na pytanie, jaka powinna być kompozycja urbanistyczna w czasach zagrożeń. Może zamiast urbanistyką powinniśmy się zająć bardziej drobiazgową kontrolą poczynań innych? Zagrożenie atakami terrorystycznymi było, jest i na pewno będzie. Dlatego forma i funkcja przestrzeni powinny zapewniać bezpieczeństwo i jednocześnie wpływać na estetykę oraz kompozycję przestrzeni miejskiej. Dodatkowym elementem ochrony powinna być jednak drobiazgową kontrola działań ludzi w przestrzeni współczesnego miasta, czyli w pewnym sensie powrót do zasad głoszonych przez Platona.

Literatura

- Coolset R. (2010), EU counterterrorism strategy: value added or chimera, *International Affairs*, vol 85/issue 4, s. 857–873.
- Graham S. (2004), *Cities, war, and terrorism in history and theory*, London, Blackwell.
- Graham S. (2006), Cities and the war on terror, *International Journal of Urban and Regional Research*, vol. 30.2, s. 255–276.
- Jackson R. (2009), The study of terrorism after 11 September 2001: Problems, challenges, and future developments, *Political Study Review*, vol. 7, s. 171–184.
- Jacobs J. (1961), *The death and life of great American cities*, New York, Vintage Books.
- Jasiński A. (2010), Techniczne i technologiczne środki zabezpieczenia budynków przed atakami terrorystycznymi, *Czasopismo Techniczne, Architektura*, 8-A.
- Jasiński A. (2012), Miasta i wojny przyszłości, *Czasopismo Techniczne, Architektura*, 1-A/1.
- Nadolny A. (2012), Kompozycja przestrzeni miejskiej w kontekście zagrożeń atakami terrorystycznymi, *Czasopismo Techniczne, Architektura*, 1-A/2.
- Nadolny A. (2008), Nowe formy przestrzeni publicznych na przykładzie Poznania, w: *Komercjalizacja przestrzeni – charakterystyka zjawiska*, red. P. Lorens, Warszawa, Biblioteka Urbanisty nr 12.
- Szacki J. (2008), *Historia myśli socjologicznej*, Warszawa, PWN.

3. Analiza zagrożeń terrorystycznych centralnych obiektów infrastruktury krytycznej

3.1. Wprowadzenie

Obecnie, szczególnie po atakach terrorystycznych w USA 11 września 2001 roku, na całym świecie nastąpiło wzmożone przeciwdziałanie terroryzmowi. Jednym z tych działań jest szeroko rozumiana ochrona, zarówno techniczna jak i fizyczna, **centralnych obiektów infrastruktury krytycznej (COIK)**, stanowiących tzw. **dozorowany kompleks budowlany**. Jednym z elementów należących do systemu tej ochrony są zabezpieczenia techniczne i budowlane. **Dozorowany kompleks budowlany COIK** jest to zespół budynków i budowli wraz z infrastrukturą (sieciami i urządzeniami), który może być częściowo lub całkowicie odgradzony od otoczenia (dostępny dla osób nieuprawnionych lub tylko dla osób uprawnionych). Teren w rozumieniu ochrony i zabezpieczenia to zewnętrzne otoczenie dozorowanego obiektu budowlanego COIK. Dozorowany kompleks budowlany COIK wraz z otaczającym terenem oraz strefami bezpieczeństwa i administracyjnymi niedostępny dla osób nieuprawnionych stanowi tzw. **kompleks zamknięty**.

Niżej określono ogólne warunki zabezpieczeń technicznych następujących, powszechnie przyjętych kategorii dozorowanych kompleksów, w tym COIK:

- kategoria A – kompleksy znajdujące się w strefie działań wojennych,
- kategoria B – kompleksy zagrożone działaniami terrorystycznymi,
- kategoria C – kompleksy, w których szczególniemu zagrożeniu podlega bezpieczeństwo osób i mienia,
- kategoria D – kompleksy, w których podwyższonemu zagrożeniu podlega bezpieczeństwo osób i mienia,
- kategoria E – kompleksy, w których bezpieczeństwo osób i mienia nie jest zagrożone.

System ochrony dozorowanych kompleksów powinien być wielokierunkowy i obejmować zarówno ochronę techniczną (zabezpieczenia techniczne i budowlane), jak i osobową. Ochronę osobową zapewniają licencjonowani pracownicy ochrony [Ustawa 1997] (w tym wewnętrzne służby ochrony [Rozporządzenie 1998, 2010], np. służba ochrony lotniska SOL, straż ochrony kolei SOK [Rozporządzenie 2004], specjalistyczne uzbrojone formacje ochronne [Rozporządzenie 1999]) lub dozorczy, portierzy itp.

Zabezpieczenia techniczne (mechaniczne) i budowlane zamkniętych kompleksów COIK są to środki techniczne służące do ochrony życia i zdrowia osób oraz do ochrony mienia, a także informacji niejawnych. Można wśród nich wyróżnić:

1. Zabezpieczenia budowlano-mechaniczne stanowiące techniczną przeszkodę, której pokonanie jest możliwe z użyciem siły i z pozostawieniem śladów

(aspekt techniki kryminalistycznej). Istotnym kryterium oceny tych zabezpieczeń jest skuteczność oporu (odporność). Przeszkoda techniczna to przede wszystkim przegroda budowlana wraz z elementami budowlanymi (otwory drzwiowe, okienne, wentylacyjne itp.) i urządzeniami mechanicznymi (stałe i zwijane kraty stalowe, rolety przeciwwłamaniowe, siatki z drutu stalowego, zamki, łańcuchy).

2. Elektryczne (elektroniczne) urządzenia alarmowe (przeciwwłamaniowe i przeciwnapadowe), które uruchamiają się automatycznie w przypadku próby włamania i wtargnięcia do strzeżonych obszarów i pomieszczeń.
3. Urządzenia alarmowe przeciwpożarowe służące do bezpośredniego wzywania osób w przypadku zagrożenia pożarem i/lub do wykrywania pożaru i powiadamiania o nim odpowiednio wcześniej. Służą one także do ochrony osób i mienia.

Urządzenia do kontroli terenu zewnętrznego (otwartego) wokół obiektów zamkniętych są to środki techniczne umieszczone w obrębie chronionej przestrzeni, zwykle w granicach nieruchomości budowlanej, takie jak:

- budowlano-mechaniczne (ogrodzenia, mury, zapory, bramy, portiernie, dyżurki, oświetlenie),
- elektroniczne urządzenia wykrywające (centrale nadzoru, wykrywacze, czujniki, telewizja dozorowa CCTV, systemy kontroli wejścia, przekazywanie informacji do wyższych jednostek),
- środki personalno-organizacyjne (personel, grupy specjalne, obserwowanie, nadzór, program akcji alarmowej).

Podstawowe zadania tych urządzeń to prawne rozgraniczenie terenu, odstraszanie, powstrzymanie, opóźnianie, wczesne ostrzeżenie, wykrywanie i identyfikacja osób i pojazdów.

Optymalnym rozwiązaniem systemu zabezpieczeń kompleksów zamkniętych COIK są zabezpieczenia budowlano-mechaniczne wraz z właściwie zainstalowanymi elektronicznymi urządzeniami alarmowymi i kontrolnymi. Wykonywanie czynności związanych z projektowaniem i nadzorowaniem zabezpieczeń technicznych i budowlanych zamkniętych kompleksów COIK wymaga posiadania zarówno licencji pracownika zabezpieczenia technicznego drugiego stopnia [Ustawa 1997], jak i uprawnień budowlanych w branżach: konstrukcyjno-budowlanej oraz instalacyjnej w zakresie sieci, instalacji i urządzeń elektrycznych i elektroenergetycznych. Należy nadmienić, że odpowiednie, wystarczające lub niewystarczające użycie typów i klas elektronicznych czujników przeciwwłamaniowych zależy m.in. od: rodzaju przegrody budowlanej, rodzaju elementu budowlanego, wielkości i przeznaczenia pomieszczenia, klimatu (temperatury, wilgotności, ruchów powietrza) i akustyki pomieszczenia.

W tym rozdziale przedstawiono ogólne standardy systemu zabezpieczeń technicznych i budowlanych dozorowanych kompleksów COIK – opracowane na podstawie analizy bezpieczeństwa chronionych obiektów budowlanych z uwzględnieniem zasad projektowania architektoniczno-budowlanego, projek-

towania terenu i elementów budynków – zwiększające bezpieczeństwo tych kompleksów, przebywających w nich osób i mienia. W standardach tych uwzględniono skumulowane ryzyko wystąpienia zagrożenia, w tym terrorystycznego. Umożliwiają one optymalny wybór sposobów zabezpieczeń technicznych i budowlanych.

3.2. Analiza bezpieczeństwa dozorowanych kompleksów centralnych obiektów infrastruktury krytycznej

Jednym z podstawowych zadań w analizie zabezpieczeń technicznych i budowlanych dozorowanych kompleksów COIK jest ocena stopnia zagrożenia bezpieczeństwa, w tym zagrożenia aktem terrorystycznym. Ocenę tą należy oprzeć na skumulowanej ocenie ryzyka dokonanej w ramach analizy bezpieczeństwa dozorowanego kompleksu COIK, w tym poszczególnych obiektów budowlanych znajdujących na terenie tego kompleksu.

Skumulowana (łączna) ocena ryzyka obejmuje z reguły 13 głównych czynników, dla których ustala się **współczynnik ryzyka** (tab. 3.1). Te czynniki dotyczą zarówno elementów obiektu budowlanego, jak i dozorowanego kompleksu COIK.

Tab. 3.1. Czynniki rozpatrywane w ramach oceny ryzyka [Kruszka 2003]

Czynniki rozpatrywane w ramach oceny ryzyka	Współczynnik ryzyka
1	2
1. Konstrukcja nośna obiektu budowlanego	
– obiekt tymczasowy	2,0
– drewniana lub lekka konstrukcja stalowa	0,5
– żelbetowa, betonowa, murowana (w tym kamienna)	0
2. Materiał ościeżnic drzwiowych lub okiennych obiektu	
– tworzywo sztuczne	2,5
– drewno miękkie (iglaste) lub aluminium	2,0
– drewno twarde	1,0
– tworzywo wzmocnione stalą	0,5
– stal	0
3. Jakość okuć drzwiowych i okiennych obiektu	
– niska (oszczędna)	3,0
– przeciętna	2,5
– średnia	1,0
– wysoka	0
4. Lokalizacja obiektu/kompleksu	
– śródmieście (centrum)	5,0
– oddalona od centrum	4,0
– obrzeże dużego miasta lub śródmieścia	2,0
– małe miasto	1,0
– wieś	0

Tab. 3.1 cd.

Czynniki rozpatrywane w ramach oceny ryzyka	Współczynnik ryzyka
1	2
5. Charakter sąsiedztwa obiektu/kompleksu	
– zaniedbane	1,5
– dobrze wyposażone (urządzone)	0,5
– przeciętne	0
6. Łatwość dostępu i poruszania się samochodem	
– łatwy	3,0
– umiarkowany	1,0
– trudny	0
7. Dostęp pieszych do części bocznych i tylnych obiektu/kompleksu	
– łatwy	3,0
– umiarkowany	1,0
– trudny	0
8. Przebywanie osób w obiekcie/kompleksie (użytkowanie)	
– długie okresy pozostawiania obiektu w stanie nieużytkowanym	4,0
– regularne, określone okresy nieużytkowania obiektu	3,5
– nieregularne, długie okresy nieużytkowania obiektu	3,0
– krótkie okresy nieużytkowania obiektu	2,0
– stałe przybywanie osób w obiekcie (obiekt w stanie użytkowania)	0
9. Przebywanie osób w sąsiednich obiektach (użytkowanie)	
– obiekty nieużytkowane	2,5
– obiekty często użytkowane	1,5
– obiekty użytkowane	0
10. Widok obiektu/kompleksu dostępny dla przechodniów	
– obiekt widoczny z odległości, niewielu przechodniów	3,0
– obiekt całkowicie zasłonięty	2,5
– jedna lub więcej zasłoniętych elewacji	2,0
– elewacje widoczne z okien sąsiednich budynków	1,5
– wszystkie elewacje w pełni widoczne	0
11. Poziom zapewnionego oświetlenia zewnętrznego	
– obiekt i sąsiadujący teren słabo oświetlone	2,5
– obiekt dobrze oświetlony, teren słabo oświetlony	1,5
– obiekt i sąsiadujący teren dobrze oświetlone	0
12. Alarm wykrywający intruzów	
– zaden	3,0
– podstawowy	2,0
– zaawansowany	1,0
– zaawansowany, łącznie z kontrolą dostępu	0
13. Poziom wcześniejszych strat w obiekcie/kompleksie	
– wysoki	2,5
– średni	1,5
– niski	0

W tabeli 3.2 podano minimalny stopień ryzyka wyznaczony dla poszczególnych kategorii dozorowanych kompleksów COIK na I etapie analizy bezpieczeństwa na podstawie tzw. skumulowanej oceny ryzyka.

Tab. 3.2. Minimalny stopień ryzyka wyznaczony dla dozorowanych kompleksów COIK [Kruszka 2003]

Skumulowana ocena ryzyka	Stopień ryzyka	Kategoria kompleksu COIK
< 14	bardzo niski	E
14÷19	niski	D
19÷23	przeciętny	C
23÷27	wysoki	B
> 27	bardzo wysoki	A

W ramach II etapu analizy bezpieczeństwa dozorowanych kompleksów COIK dla ustalenia sposobów zabezpieczeń technicznych i budowlanych należy zastosować podejście mieszane i wykorzystać zarówno wiedzę i doświadczenie ekspertów, jak i techniki analizy ryzyka. W tej analizie bezpieczeństwa dozorowanego kompleksu COIK należy się posłużyć tzw. **arkuszem (matrycą) analizy ryzyka**, które definiowane jest jako możliwość powstania niepożądanego skutku w pewnym czasie i w określonych okolicznościach. To ryzyko stanowi kombinację dwóch składników: prawdopodobieństwa wystąpienia zagrożenia terrorystycznego powodującego niepożądane skutki oraz prognozowanej wielkości skutków (strat lub szkód) ataku terrorystycznego. Prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożenia terrorystycznego COIK (zdarzenia) można ocenić za pomocą skali jakościowej (opisowej) przedstawionej w tab. 3.3 [Zieliński 2012].

Tab. 3.3. Jakościowa skala prawdopodobieństwa zdarzenia [Zieliński 2012]

Skala	Prawdopodobieństwo	Opis
1	2	3
1	bardzo małe	zdarzenia mogą wystąpić tylko w wyjątkowych okolicznościach, raz na pięćset lub więcej lat
2	małe	nie oczekuje się, że zdarzenia mogą wystąpić, i/lub nie są w ogóle udokumentowane, nie istnieją w przekazach ludzi i/lub istnieje mała szansa, powód czy inne okoliczności, aby mogły wystąpić; mogą wystąpić raz na sto lat
3	możliwe	zdarzenia mogą wystąpić w określonym czasie i/lub rzadko, przypadkowo; są udokumentowane lub informacja o nich jest przekazywana częściowo w formie ustnej; mogą wystąpić raz na dwadzieścia lat

Tab. 3.3 cd.

1	2	3
4	prawdopodobne	jest prawdopodobne, że zdarzenia wystąpią w większości okoliczności i/lub są systematycznie dokumentowane, a informacje o nich są przekazywane w formie ustnej, i/lub jest duża szansa, powód ich wystąpienia; mogą wystąpić raz na pięć lat
5	bardzo prawdopodobne	oczekuje się, że wystąpią w większości okoliczności i/lub są bardzo dobrze udokumentowane, a informacje o nich są przekazywane w formie ustnej; mogą wystąpić raz na rok lub częściej

Do prognozowanych skutków ataku terrorystycznego można również zastosować skalę jakościową (tab. 3.4), z której należy dobierać parametry najbliższe rzeczywistości z kategorii: Z (życie i zdrowie), M (mienie wraz z infrastrukturą) i S (środowisko).

Tab. 3.4. Jakościowa skala prognozowanych skutków [Zieliński 2012]

Skala	Skutki	Kategoria	Opis jakościowy
1	2	3	4
a	nieistotne	Z	nie ma ofiar śmiertelnych i rannych; nikt nie wymagał przemieszczenia lub mała liczba osób została przemieszczona na krótki czas (do dwóch godzin); nikt nie potrzebował pomocy finansowej lub materialnej lub mała liczba osób wymagała takiej pomocy
		M	nie występują zniszczenia obiektów budowlanych kompleksu tylko jego uszkodzenia; brak strat finansowych lub są one niewielkie
		S	niemierzalny skutek w środowisku naturalnym
b	małe	Z	mała liczba rannych, lecz bez ofiar śmiertelnych; wymagana pierwsza pomoc medyczna; konieczne przemieszczenie ludzi (krócej niż na 24 godziny); część ludzi potrzebuje pomocy finansowej lub materialnej
		M	występują pewne zniszczenia i uszkodzenia obiektów budowlanych kompleksu oraz utrudnienia (nie dłużej niż 24 godziny); niewielkie straty finansowe; nie są wymagane dodatkowe środki
		S	niewielki krótkotrwały wpływ na środowisko naturalne
c	średnie	Z	potrzebna pomoc medyczna, lecz bez ofiar śmiertelnych; niektóre osoby wymagają hospitalizacji; potrzebne dodatkowe miejsca w pobliskim szpitalu oraz dodatkowy personel medyczny; ewakuowanie ludzi do wyznaczonych miejsc z możliwością powrotu w ciągu 24 godzin
		M	ustalenie miejsc zniszczeń i uszkodzeń obiektów budowlanych kompleksu, które wymagają rutynowej naprawy; spore straty finansowe

Tab. 3.4 cd.

1	2	3	4
d	duże	S	pewne skutki w środowisku naturalnym, lecz krótkotrwałe, lub małe skutki o długotrwałym działaniu
		Z	mocno poranione osoby, dużo osób hospitalizowanych, duża liczba przemieszczonych osób (na dłużej niż 24 godziny); ofiary śmiertelne; potrzebne szczególne zasoby, by pomóc ludziom i usunąć zniszczenia obiektów budowlanych kompleksu
e	katastrofalne	M	duże straty finansowe; potrzebna pomoc z zewnątrz
		S	długotrwałe skutki w środowisku naturalnym
		Z	duża liczba poważnie rannych; duża liczba osób hospitalizowanych; duża liczba ofiar śmiertelnych; wymagana duża pomoc dla dużej liczby ludzi
		M	rozległe zniszczenia infrastruktury kompleksu
		S	duży wpływ na środowisko naturalne i/lub trwałe zniszczenie środowiska

W analizie ryzyka należy ująć charakterystykę dozorowanego kompleksu COIK, możliwe rodzaje zagrożeń terrorystycznych, systemy ochrony fizycznej i technicznej, bezpieczeństwo kadrowe pracowników, działania organizacyjne COIK w zakresie bezpieczeństwa (tzw. zarządzanie ochroną i bezpieczeństwem):

1. Charakterystyka dzielnicy (rejonu) miasta ze względu na:

- położenie COIK (centrum, peryferie itp.),
- otoczenie COIK (gmachy użyteczności publicznej, militarne, przemysłowe, typ budownictwa mieszkaniowego itp.),
- zabudowę COIK (wolno stojąca, zwarta, w kompleksie budowlanym),
- wejścia główne i zapasowe oraz drogi ewakuacyjne.

2. Rodzaje zagrożeń COIK związane z:

- terroryzmem,
- konfliktem zbrojnym,
- niepokojami społecznymi,
- aktywnością służb specjalnych,
- przestępczością zorganizowaną,
- przestępczością pospolitą,
- klęskami żywiołowymi,
- możliwościami katastrofy ekologicznej (technologicznej).

3. Charakterystyka COIK:

- ogrodzenie (rodzaj materiału i wysokość),
- zapory, szlabany, śluzy wjazdowe itp.,
- brama wjazdowa i furtka wejściowa (rodzaj i sposób zamknięć, sygnalizacja wejścia/wjazdu),

- zewnętrzne oświetlenie (oświetlenie drogi dojścia do kompleksu, lampy wyposażone w wyłączniki zmierzchowe, oświetlenie zapalane przez pracownika ochrony, pracownika COIK, inną osobę),
- zabezpieczenie otworów okiennych (okna na parterze i do piwnic, szyby antywłamaniowe, osadzenie w odpowiednio wzmocnionej stolarce, wyposażenie w zamknięcia obwiedniowe lub blokady antywyważeniowe, kraty zewnętrzne i wewnętrzne, rolety antywłamaniowe),
- wejście do COIK w formie śluzy (rodzaj śluzy i procedura kontroli),
- wydzielone strefy bezpieczeństwa, do których dostęp jest kontrolowany,
- system zabezpieczenia kontroli wejścia osób do stref bezpieczeństwa (drzwi z elektrozamkiem i klawiaturą, drzwi z elektrozamkiem, krata z elektrozamkiem i klawiaturą, system klucza generalnego),
- system technicznego zabezpieczenia (zabezpieczenie mechaniczne: system klucza generalnego, specjalne zamki; zabezpieczenie elektroniczne: system alarmu włamania, system kontroli dostępu, telewizyjny system dozorowy CCTV (ang. *closed-circuit television* – telewizja o zamkniętym obwodzie),
- monitoring CCTV,
- system wykrycia,
- gospodarka kluczami COIK w przypadku braku klucza generalnego (gdzie klucze są deponowane, w jaki sposób są pobierane i zdawane),
- sposób nadzoru i monitorowania systemów zabezpieczeń (licencjonowani pracownicy ochrony, wyznaczeni pracownicy, inni),
- prowadzenie zapisu alarmów/obrazów systemów zabezpieczenia technicznego i okresów tego zapisu,
- prowadzenie dziennika wejść/wyjść pracowników i gości COIK,
- sposób ewidencjonowania przypadków służbowego pozostawiania pracowników w pomieszczeniach COIK po godzinach urzędowania,
- tryb monitorowania systemów zabezpieczeń (24 godziny na dobę, tylko w porze wieczorowo-nocnej, doraźnie w miarę możliwości, nikt nie monitoruje, inne),
- miejsce stanowiska monitorowania systemów – centrali alarmowej systemu (na wydzielonej dyżurce, w pokoju pracownika COIK, inne),
- pomieszczenie z urządzeniami systemów zabezpieczenia technicznego (w których strefach),
- konserwacja i serwis systemów zabezpieczenia technicznego (data ostatniej konserwacji/naprawy, kto wykonywał),
- rezerwowe źródła zasilania systemów zabezpieczeń (system kontroli dostępu, system sygnalizacji napadu i włamania – SSNiW, CCTV, system klucza generalnego),

- ochrona fizyczna kompleksu: wewnętrzna, zewnętrzna (licencjonowani pracownicy ochrony, patrole lotne, koncesjonowana firma ochraniarska: całodobowo, godzinowo),
 - pracownicy ochrony (aktualny, podpisany zakres obowiązków, grafik dyżurów zaakceptowany przez osobę odpowiedzialną za bezpieczeństwo),
 - wyposażenie COIK (urządzenie do przeglądania poczty – typ, urządzenie do prześwietlania bagażu – typ, ręczne wykrywacze metali – typ, lusterka do sprawdzania podwozi samochodowych, wykrywacze materiałów wybuchowych, czujniki progowe promieniowania, inne urządzenia),
 - szkolenie pracowników COIK w zakresie zasad bezpieczeństwa i zagrożeń.
4. Dokumentacja bezpieczeństwa COIK:

- plan ochrony,
- plan zabezpieczenia na wypadek ataku terrorystycznego,
- instrukcja postępowania w przypadku: informacji o podłożeniu ładunku wybuchowego, otrzymania podejrzanej przesyłki pocztowej, innych zdarzeń wyjątkowych i klęsk żywiołowych.

Ten etap analizy bezpieczeństwa umożliwia opracowanie sposobów zabezpieczenia technicznego i budowlanego dozorowanego kompleksu COIK w zależności od kategorii zagrożenia.

3.3. Analiza standardów antyterrorystycznych w odniesieniu do centralnych obiektów infrastruktury krytycznej

Zgodnie z art. 5 ust. 1 Prawa budowlanego [Ustawa 1994], każdy obiekt budowlany wraz ze związanymi z nim urządzeniami budowlanymi (urządzenia techniczne zapewniające możliwość użytkowania obiektu zgodnie z jego przeznaczeniem), do których zalicza się konstrukcje ochronne, należy projektować i budować, biorąc pod uwagę przewidywany okres użytkowania, w sposób określony w przepisach (w tym techniczno-budowlanych) oraz zgodnie z zasadami wiedzy technicznej, by zapewnić nie tylko spełnienie wymagań podstawowych, warunków użytkowych, ale także ochronę ludności, zgodnie z wymaganiami obrony cywilnej. Obecnie w Polsce brak jest przepisów techniczno-budowlanych, o których mowa w art. 7 Prawa budowlanego, w sprawie konstrukcji chroniących obiekty budowlane, w tym w szczególności COIK, przed bezpośrednimi obciążeniami wyjątkowymi, wynikającymi z aktów terrorystycznych. Przedmiotem analizy w tym podrozdziale nie jest ostrzał moździerzowy, raketowy ani snajperski, lecz podłożony ładunek skondensowanego materiału wybuchowego w postaci wolnej lub zamkniętej jako składnik rażenia typu standardowego lub improwizowanego. Rozróżnia się dwa przypadki podłożenia tego ładunku względem obiektu budowlanego:

- w styczności z obiektem, tzw. ładunek kontaktowy,
- w określonym oddaleniu (w pobliżu obiektu budowlanego).

W obszarze kontaktu (przyłożenia) ładunku na powierzchni elementu obiektu występują nadciśnienia rzędu 10 GPa [Szcześniak 2012]. W zależności od rodzaju elementu konstrukcyjnego, sposobu jego wzmocnienia, wielkości ładunku materiału wybuchowego oraz odległości jego usytuowania względem powierzchni tego elementu występują lokalne strefy zniszczenia i uszkodzenia materiału konstrukcyjnego (tzw. efekt destrukcyjny), łącznie z przebiciem konstrukcyjnej przegrody budowlanej i odłamek na powierzchni swobodnej tej przegrody. Do oszacowania zasięgu powyższych stref stosuje się symulacje numeryczne lub wzory empiryczne.

Powietrzna eksplozja materiału wybuchowego wywołuje obciążenie obiektu budowlanego powietrzną falą podmuchową, uderzenia odłamkami oraz wstrząs podłoża gruntowego.

Zgodnie z ustawą o wyrobach budowlanych [Ustawa 2004], **budowle i konstrukcje ochronne** obiektów budowlanych COIK należy wykonywać z **wyrobów budowlanych** do tego przeznaczonych, które mają krajowe lub europejskie deklaracje zgodności z normami PN-EN oraz z aprobatami technicznymi lub są dopuszczone do jednostkowego użycia w obiekcie budowlanym według indywidualnej dokumentacji technicznej, sporządzonej przez projektanta obiektu lub z nim uzgodnionej, na podstawie oświadczenia producenta, że zapewniono zgodność wyrobu budowlanego z tą dokumentacją i przepisami.

Należy w tym miejscu nadmienić, że zgodnie z § 16 pkt 6 Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 8 listopada 2004 roku w sprawie aprobat technicznych oraz jednostek organizacyjnych upoważnionych do ich wydawania [Rozporządzenie 2004], Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie jest właściwą jednostką aprobowaną do udzielania, uchylania i zmiany aprobat technicznych w odniesieniu do wyrobów budowlanych stosowanych wyłącznie w budownictwie obronnym. Z kolei zgodnie z Ustawą o ocenie zgodności z 30 sierpnia 2002 roku [Obwieszczenie 2010] Polskie Centrum Akredytacji (PCA) prowadzi procesy akredytacji i sprawuje nadzór nad jednostkami certyfikującymi wyroby, m.in. elementy budowli i konstrukcji ochronnych. Jedną z tych jednostek jest Zakład Certyfikacji Instytutu Mechaniki Precyzyjnej (IMP) w Warszawie, który wydaje certyfikaty zgodności z PN-EN wyrobów przeznaczonych do wykonywania budowli i konstrukcji ochronnych.

Podstawowymi czynnikami destrukcyjnego oddziaływania ładunku materiału wybuchowego zdetonowanego w pobliżu budynku są:

- powietrzna fala uderzeniowa (podmuchowa fala nadciśnienia),
- rozrzut odłamków,
- fala parasejsmiczna w podłożu gruntowym.

Powietrzna fala uderzeniowa (podmuchowa) jest czynnikiem, który towarzyszy każdej detonacji materiału wybuchowego. Jest to zaburzenie stanu ośrodka charakteryzujące się przede wszystkim skokowym wzrostem ciśnienia, zagrażającym zdrowiu i życiu ludzi oraz bezpieczeństwu konstrukcji obiektu budowlanego.

Rozrzut odłamków występuje przede wszystkim wtedy, gdy materiał wybuchowy jest otoczony ośrodkiem stałym lub w wyniku skruszenia dużej ilości elementów elewacji, np. kamiennych murowanych balustrad, murków, parapetów znajdujących się na drodze powietrznej fali podmuchowej. Odległości rozrzutu odłamków kruszonego ośrodka zależą od wielu czynników, głównie od rodzaju ośrodka, masy odłamka, jego objętości, powierzchni przekroju, prędkości początkowej i kąta rzutu. Maksymalnie możliwe odległości rażenia odłamkami w zależności od rodzaju ośrodka są podane w przepisach bezpieczeństwa. Przykładowo, dla konstrukcji drewnianych wynoszą one 150 m, murowanych 350 m, metalowych 500 m.

Niebezpieczna fala parasejsmiczna występuje wówczas, gdy detonacja materiału wybuchowego następuje w gruncie. Fala ta stanowi podstawowe zagrożenie dla budynków znajdujących się w pobliżu miejsca wybuchu. Promień strefy niebezpiecznego działania fali parasejsmicznej można oszacować na podstawie wzoru [Zarządzenie 2004]:

$$R_S = K_S \alpha \mathcal{L}^{1/3} \quad (3.1)$$

gdzie: R_S – promień strefy niebezpiecznej [m],

K_S – współczynnik zależny od rodzaju podłoża gruntowego, na którym jest posadowiony obiekt,

\mathcal{L} – masa ładunku [kg],

α – współczynnik zależny od wskaźnika działania wybuchu.

Podczas projektowania i wykonywania budowli i konstrukcji ochronnych odpornych na detonację ładunku wybuchowego należy się posługiwać przede wszystkim normą PN-EN 13124: 2004 *Okna, drzwi, żaluzje i zasłony. Odporność na wybuch. Wymagania i klasyfikacja*.

Projektując konstrukcje ochronne z wyrobów dopuszczonych na podstawie indywidualnej dokumentacji technicznej, można się posługiwać formułami na nadciśnienie powietrznej fali podmuchowej Δp podanymi w literaturze technicznej. Są to np.:

– empiryczny wzór Sadowskiego

$$\Delta p = 84 \frac{c^{2/3}}{r} + 270 \frac{c^{2/3}}{r^2} + 700 \frac{c}{r^3} \quad (3.2)$$

gdzie: Δp – nadciśnienie na froncie fali padającej [kPa],

c – masowy równoważnik trotylowy energii wybuchu przenoszonej przez falę uderzeniową [kg],

r – odległość od miejsca wybuchu [m];

– wzór z Rozporządzenia Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 9 lipca 2003 roku w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy produkcji, transporcie wewnątrzzakładowym oraz obrocie materiałów wybu-

chowych, w tym wyrobów pirotechnicznych; nadciśnienie fali uderzeniowej Δp (w kilkopaskalach) jest funkcją odległości czoła fali L (w metrach) od miejsca detonacji materiału wybuchowego i jego równoważnika heksogenowego G ; wyznacza się je doświadczalnie w badaniach modelowych lub określa według wzoru (3.3) [Rozporządzenie 2003]:

$$\Delta p = 980 \left(LG^{-\frac{1}{3}} \right)^{-1,89} \quad (3.3)$$

3.4. Koncepcja konstrukcji ochronnej centralnych obiektów infrastruktury krytycznej

Skutecznym sposobem zabezpieczenia obiektu przed skutkami wybuchu w jego pobliżu jest wprowadzenie tzw. fasady (osłony) antydetonacyjnej i kuloodpornej. Dotychczas dla spełnienia warunków odporności na wybuchy stosowano w obiektach masywne przegrody budowlane o konstrukcji żelbetowej. Chroniony w taki sposób obiekt budowlany stawał się schronem, w którym z uwagi na brak światła dziennego ludzie nie mogli pracować w pełnym wymiarze godzin. Warunki pracy były również szkodliwe ze względu na pełne ściany żelbetowe. Współczesna konstrukcja fasad antydetonacyjnych i kuloodpornych umożliwia wykonanie ich na istniejących COIK bez zmiany ich konstrukcji i funkcji. Zapewniają one estetykę elewacji oraz w istotny sposób zwiększają bezpieczeństwo tych obiektów. Fasada powinna być odporna na wybuchy i ostrzał z broni palnej oraz spełniać następujące polskie normy ochronne:

- PN-EN 13124: 2004 *Okna, drzwi i żaluzje. Odporność na wybuch. Wymagania i klasyfikacja*, która jest oparta na normie europejskiej EN 13124: 2004,
- PN-EN 13541: 2002 *Szkoło w budownictwie. Bezpieczne oszklwienia. Badanie i klasyfikacja odporności na siłę eksplozji*, której odpowiednik europejski to EN 13541: 2000,
- PN-EN 1522: 2000 *Okna, drzwi, żaluzje i zasłony. Kuloodporność. Wymagania i klasyfikacja*.

Należy w tym miejscu nadmienić, że budynki wyposażone w fasady ochronne charakteryzują się mniejszą energochłonnością. Współczesne wyroby budowlane, z których wykonuje się fasady, zapewniają optymalną izolacyjność termiczną. Dostępne na rynku fasady aluminiowo-szklane charakteryzują się współczynnikiem przenikalności cieplnej 1,4–1,6 W/(m² · K). Fasada ochronna ma współczynnik przenikalności cieplnej na poziomie 1,3 W/(m² · K). Warstwowe szyby ochronne zamontowane w fasadzie mają ten współczynnik nie większy niż 1,0 W/(m² · K). Fasada zwiększa także izolacyjność akustyczną przegrody.

Roboty budowlane mające na celu zabezpieczenie techniczne są prowadzone na zewnątrz chronionego budynku, przy ograniczonej ingerencji w jego wnętrze.

Istnieje duża różnorodność elementów ochronnych: wielowarstwowych szyb lub nieprzeziernych wypełnień (np. pełnych metalowych paneli, stałych i zwijanych żaluzji), a także elementów dodatkowych instalowanych w przestrzeni wewnętrznej, np. elementów klimatyzacji. Fasada ogranicza także penetrację optyczną z zewnątrz, natomiast pracownikom ochrony umożliwia dyskretne obserwowanie i aktywną obronę obiektu COIK z niewidocznych na zewnątrz stanowisk ogniowych uzbrojonych formacji ochronnych.

W skład zespołu projektującego konstrukcje i/lub budowle ochronne COIK, w tym fasady ochronne, z wykorzystaniem podanych tutaj wytycznych projektowych i norm powinny wchodzić osoby posiadające licencję pracownika technicznych zabezpieczeń budowlano-mechanicznych II stopnia [Ustawa 1997].

Literatura

Kruszka L. (2003), Zabezpieczenia budowlano-mechaniczne dozorowanych obiektów i kompleksów budowlanych, *Przegląd Budowlany*, nr 4, s. 24–30.

Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 13 lipca 2010 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy o systemie oceny zgodności, Dz.U., nr 138, poz. 935.

PN-EN 1522: 2000 *Okna, drzwi, żaluzje i zasłony. Kuloodporność. Wymagania i klasyfikacja*.

PN-EN 13541: 2002 *Szkle w budownictwie. Bezpieczne oszklenia. Badanie i klasyfikacja odporności na siłę eksplozji*.

PN-EN 13124:2004 *Okna, drzwi, żaluzje i zasłony. Odporność na wybuch. Wymagania i klasyfikacja*.

Rozporządzenie Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 9 lipca 2003 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy produkcji, transporcie wewnątrz-zakładowym oraz obrocie materiałów wybuchowych, w tym wyrobów pirotechnicznych, Dz.U., nr 163, poz. 1577.

Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 14 lipca 2004 r. w sprawie szczegółowego zakresu działania oraz sposobu organizacji straży ochrony kolei, Dz.U., nr 164, poz. 1718.

Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 8 listopada 2004 r. w sprawie aprobat technicznych oraz jednostek organizacyjnych upoważnionych do ich wydawania, Dz.U., nr 249, poz. 2497 z późn. zm.

Rozporządzenie Ministra Obrony Narodowej z dnia 19 czerwca 1999 r. w sprawie ochrony przez specjalistyczne uzbrojone formacje ochronne terenów komórek i jednostek organizacyjnych resortu obrony narodowej, Dz.U., nr 60, poz. 647.

Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 17 listopada 1998 r. w sprawie wewnętrznych służb ochrony, Dz.U., 1999, nr 4, poz. 31.

Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 5 maja 2010 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie wewnętrznych służb ochrony, Dz.U., nr 88, poz. 582.

Sadovskij M. (1971), *Mehaničeskij éffekt podzemnogo vzryva*, Moskva.

Szcześniak Z. (2012), Charakterystyka podstawowych zagrożeń i czynników rażących uwzględnianych w procesie kształtowania schronów i ukryć, w: *XXVI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna EKOMILITARIS 2012 „Inżynieria bezpieczeństwa – ochrona przed skutkami nadzwyczajnych zagrożeń”*, red. Z. Mierczyk, J. Wasilczuk, Zakopane, s. 595–614.

Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. Prawo budowlane, Dz.U., 2006, nr 156, poz. 1118 z późn. zm.

Ustawa z dnia 22 sierpnia 1997 r. o ochronie osób i mienia, Dz.U., 2005, nr 145, poz. 1221 z późn. zm.

Ustawa z dnia 16 kwietnia 2004 r. o wyrobach budowlanych, Dz.U. nr 92, poz. 881 oraz Dz.U., 2009, nr 18, poz. 97.

Zarządzenie nr 4/Inż. z dnia 13 grudnia 1994 r. Instrukcja „Prace minerskie i niszczenia”, Warszawa, Sztab Generalny WP, Szefostwo Wojsk Inżynieryjnych, 1995.

Zieliński K.R. (2012), Analiza zagrożeń i ocena ryzyka ich wystąpienia, w: *XXVI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna EKOMILITARIS 2012 „Inżynieria bezpieczeństwa – ochrona przed skutkami nadzwyczajnych zagrożeń”*, red. Z. Mierczyk, J. Wasilczuk, Zakopane, s. 754–767.

4. Stan przepisów normowych i przegląd wytycznych do projektowania

4.1. Wstęp

Badania konstrukcji budowlanych poddawanych obciążeniu wybuchem wywodzą się wprost z projektowania i budowy fortyfikacji i umocnień. W drugiej połowie XX wieku profil tych prac wynikał z sytuacji geopolitycznej i dominujących typów zagrożeń. Po zakończeniu drugiej wojny światowej przez blisko trzydzieści lat prace były skupione na zagrożeniach związanych z bronią jądrową, choć już na początku lat 70. XX wieku coraz więcej uwagi zwracano na zagrożenia bronią konwencjonalną. Wraz z końcem zimnej wojny prace badawcze skoncentrowano na konwencjonalnych środkach bojowych znajdujących się w arsenałach regularnych armii. W ciągu ostatnich 20 lat niemal całkowicie zarzucono badania zagrożeń wynikających z użycia broni jądrowej, a zintensyfikowano prace nad nowymi rodzajami uzbrojenia konwencjonalnego, w tym przede wszystkim środkami precyzyjnego rażenia, tzw. bronią „inteligentną”, czyli środkami bojowymi o znacznej autonomii działania. W ostatniej dekadzie dużo uwagi poświęcono improwizowanym ładunkom wybuchowym (tzw. IDE – ang. *improvised explosive device*), powszechnie wykorzystywanym przez terrorystów i partyzantów. Ewolucja ta znajduje odzwierciedlenie w normach i przepisach związanych z projektowaniem konstrukcji narażonych na działanie fali uderzeniowej wybuchu.

Zagrożenie wybuchem nuklearnym, a tym bardziej termonuklearnym, wymagało zawsze przeanalizowania reakcji całości konstrukcji. Przy projektowaniu konstrukcji odpornych na działanie fali uderzeniowej związanej z eksplozją jądrową zasadniczym problemem jest zapewnienie podstawowej integralności obiektu. Takie kwestie jak odporność na działanie fali uderzeniowej fragmentu budynku lub poszczególnych elementów konstrukcyjnych (słupa, ściany itd.) są niemal zupełnie pomijalne. Sytuacja ulega odwróceniu w przypadku zagrożeń wynikających z użycia tradycyjnych środków wybuchowych. Nawet największe tradycyjne ładunki wybuchowe same w sobie najczęściej nie stanowią zagrożenia dla całości obiektu budowlanego, o którego odporności decyduje trwałość poszczególnych elementów konstrukcyjnych. W tych rozważaniach pominięto takie ładunki, jak specjalne bomby lotnicze wysokiego wagomiaru (np. amerykańskie BLU-82 i GBU-57), broń paliwowo-powietrzną i improwizowane, wielotonowe ładunki wybuchowe ze względu na ich incydentalne zastosowanie.

Prace naukowo-badawcze mające na celu zapewnienie odporności na wybuch jądrowy dotyczyły tylko obiektów wojskowych i specjalnego przeznaczenia. Zapewnienie oczekiwanej odporności było możliwe jedynie w przypadku umieszczenia obiektu pod ziemią. Często obiekty takie umieszczano w wydrążonych skałach lub co najmniej zabezpieczano grubą warstwą ziemi usypaną nad

nimi. Dostępne są jedynie nieliczne wyniki prac dotyczących obiektów naziemnych [Coltharp, Vitayaudom i Kiger 1985]. Użyteczność tych wyników, a w szczególności eksperymentów, dla obiektów cywilnych jest z oczywistych względów mocno ograniczona.

Osobną grupę stanowią badania dotyczące systemów uzbrojenia służących do precyzyjnego rażenia obiektów budowlanych. Działania zbrojne lat 90. ubiegłego wieku oraz pierwszej dekady obecnego stulecia często były prowadzone w terenie zurbanizowanym. Silna presja opinii publicznej w krajach północnoatlantyckiej strefy kulturowej wymogła minimalizowanie ofiar wśród ludności cywilnej, w związku z czym przy atakowaniu celów w strefach zurbanizowanych zrezygnowano z takich środków rażenia, jak klasyczne bomby lotnicze czy ostrzał artyleryjski na rzecz systemów precyzyjnego rażenia, takich jak bomby, pociski raketowe i artyleryjskie kierowane laserowo, telewizyjnie, termowizyjnie, inercyjnie lub za pomocą systemów nawigacji satelitarnej (np. bomba kierowana GBU-27 czy kierowany pocisk raketowy AGM-114 Hellfire). Podobnie środki bojowe o dużej autonomiczności działania (tzw. odpal i zapomnij, np. samonaprowadzający pocisk raketowy AGM-65 Maverick, pociski manewrujące AGM-86 i BGM-109 Tomahawk) wymagają zaawansowanych, precyzyjnych systemów naprowadzania, co pozwala zmniejszyć ich ładunek bojowy, a co za tym idzie – ograniczyć ewentualne straty w sytuacji niewłaściwego działania i rażenia przypadkowego celu. Takie środki bojowe służą najczęściej do niszczenia celów znajdujących się wewnątrz budynków przy zminimalizowaniu ryzyka zniszczenia całej konstrukcji, co mogłoby pochłonąć znaczą liczbę przypadkowych ofiar. Takie podejście wymaga przeanalizowania słabych punktów konstrukcji budowlanych w celu ich efektywnej penetracji z jednej strony, a z drugiej ograniczenia uszkodzeń, by zapobiec zawaleniu się części lub całości budynku. Mimo niejako odwróconych założeń i celów prowadzonych badań ich rezultaty, a w szczególności wyniki eksperymentów, mogą być w pewnej części przydatne w projektowaniu konstrukcji odpornych na działanie wybuchów, szczególnie że badania te są skupione na lokalnym działaniu środków wybuchowych oraz na analizie poszczególnych elementów konstrukcji. Szczególnie interesujące mogą być wyniki badań prowadzonych w Laboratorium Uzbrojenia Sił Powietrznych USA (AFWL), opublikowane przez Krauthammera i DeSuttera [1989], oraz inne publikacje Krauthammera [Otani i Krauthammer 1997; Ku i Krauthammer 1999] będące rezultatem jego prac w Naval Facilities Command (NAVFAC) oraz Department of Defence Explosive Safety Board (DDESB).

Niezależnie od wymienionych wyżej różnic i ich źródeł, wszystkie prowadzone na przestrzeni ostatnich 60 lat badania wpływu wybuchu na konstrukcje budowlane mają wspólny mianownik – w przeważającej większości opierają się na wynikach eksperymentów. W ramach eksperymentów poddawano działaniu fali uderzeniowej wywołanej eksplozją różnego rodzaju konstrukcje lub ich modele wykonane w pomniejszonej skali. Analizując wyniki tych eksperymentów lub korzystając z norm i przepisów powstałych na ich podstawie, należy pamiętać

tać, że nawet nominalnie identyczny ładunek wybuchowy w zależności od warunków może generować różną falę uderzeniową i wywoływać odmienne skutki, co utrudnia ich ogólnienie na potrzeby norm i instrukcji. Prowadzenie tego rodzaju badań eksperymentalnych jest trudne, wymaga dużego doświadczenia w celu zachowania racjonalnego poziomu bezpieczeństwa, podlega wielu ostrzeżeniom natury praktycznej i formalnej, zawsze wiąże się z dużym ryzykiem. Wszystko to sprawia, że są one bardzo kosztowne, więc badający pasywne bezpieczeństwo konstrukcji budowlanych stoją przed koniecznością wykorzystania wszystkich dostępnych danych eksperymentalnych, które zostały zebrane i udostępnione społeczności naukowej.

Specyfika badań odporności konstrukcji na wybuchy, ich ewolucja, głównie wojskowe lub okołowojskowe źródła finansowania, a także rodzaj instytucji prowadzących te badania – wszystko to ma duży wpływ na dostępność wyników tych badań i ich potencjalne cywilne zastosowanie. Jedynie w państwach demokratycznych o ugruntowanej cywilnej kontroli nad siłami zbrojnymi i tradycji współpracy naukowej pomiędzy instytucjami militarnymi i cywilnymi możliwy jest swobodny przepływ wytworzonej w takim systemie wiedzy. Z uwagi na wysokie koszty takich badań na ich szerokie, ciągłe prowadzenie mogą sobie pozwolić tylko państwa bogate, o dużym potencjale naukowym, ale również prowadzące aktywną politykę bezpieczeństwa wojskowego. Warunki takie spełnia niewiele państw, a dominującą pozycję wśród nich mają Stany Zjednoczone Ameryki, w związku z czym niżej przedstawiono najważniejsze amerykańskie publikacje dotyczące odporności konstrukcji na działanie fali uderzeniowej wywołanej wybuchem. Stanowią one jedyny tak obszerny, dostępny zbiór tego typu materiałów. Następnie zaprezentowano obowiązujące przepisy normowe i rozporządzenia w Polsce.

4.2. Dostępne amerykańskie normy i instrukcje

Najważniejsze amerykańskie publikacje, takie jak normy i przepisy, ale również wytyczne (podręczniki, instrukcje) dla projektantów, dotyczące odporności konstrukcji na działanie fali uderzeniowej wywołanej wybuchem podzielono na trzy zasadnicze grupy. Pierwsza z nich zawiera materiały przygotowane przez Departament Armii USA, głównie na potrzeby wojska, choć jednocześnie bardzo wartościowe do zastosowań cywilnych, jednak część z nich dostępna jest jedynie dla instytucji związanych z obronnością USA. Druga grupa to podręczniki American Society of Civil Engineers (ASCE). Są to opracowania przygotowane głównie z myślą o zastosowaniach cywilnych, w przemyśle. Wszystkie one dostępne są na rynku jako pozycje książkowe. Ostatnią grupę stanowią ogólnie dostępne publikacje agent rządowych: Departamentu Obrony, Departamentu Energii, Generalnego Urzędu ds. Usług oraz Federalnej Agencji Zarządzania Kryzysowego.

Bez wątpienia najpopularniejszy i najczęściej wykorzystywany jest *Structures to resist the effects of accidental explosions* – Tri-Service Manual TM-5-1300/UFC 3-340-002 [U.S. Department of the Army 1990]. Jest to podręcznik do projektowania konstrukcji obciążanych wybuchem, przeznaczony dla użytkowników wojskowych i cywilnych. Dla projektantów stanowi on wartościowe źródło praktycznej wiedzy. Zawiera jasno przedstawione procedury i wytyczne projektowania konstrukcji narażonych na działanie wybuchów oraz dopuszczalne zakresy odpowiedzi mechanicznej konstrukcji na obciążenia wysokoenergetyczne w zależności od ich przeznaczenia. Ze względu na jego dużą wartość i powszechność stosowania nie tylko w USA, ale również w innych państwach, opisano go szczegółowo w kolejnym podrozdziale. Następny podręcznik *Fundamentals of protective design for conventional weapons* – Army Technical Manual 5-855-1 [U.S. Department of the Army 1986] jest w dużej mierze podobny do TM-5-1300 pod względem zawartości i przeznaczenia, jednak jest adresowany do węższego grona odbiorców. Przeznaczony jest dla projektantów konstrukcji wzmocnionych, bardziej odpornych na działanie broni konwencjonalnej, a w szczególności: broni penetrującej, eksplozji kontaktowych oraz fali uderzeniowej i odłamków. Służy więc głównie do projektowania konstrukcji i instalacji wojskowych, narażonych na bezpośredni atak z użyciem różnorodnych konwencjonalnych środków bojowych, współcześnie użytkowanych przez większość armii. W praktyce jest wykorzystywany w instytucjach i agencjach związanych z obronnością USA, co znacznie ogranicza jego zastosowanie w sektorze cywilnym, niemniej wiele innych publikacji i prac jest opartych na tym źródle.

Wydany przez American Society of Civil Engineers (ASCE) w roku 1985 podręcznik *Design of structures to resist nuclear weapons effects* (Manual of Practice No. 42) [Agbabian 1985] został opracowany na potrzeby projektowania konstrukcji narażonych na działanie broni jądrowej. Jest to dobre źródło ogólnych informacji o projektowaniu konstrukcji odpornych na falę uderzeniową. Ze względu na specyfikę jądrowych środków bojowych nie zawiera on jednak informacji o lokalnym oddziaływaniu na poszczególne elementy konstrukcyjne, co mocno ogranicza jego przydatność do analizy zagrożeń typu terrorystycznego z wykorzystaniem relatywnie niedużych, improwizowanych ładunków wybuchowych.

Kolejna warta uwagi pozycja ASCE to wydane w roku 1997 (drugie wydanie w 2010 roku) wytyczne do projektowania instalacji petrochemicznych *Design of blast-resistant buildings in petrochemical facilities* [Baunds 2010]. Podręcznik ten zawiera szczegółowe informacje i zalecenia przydatne w projektowaniu konstrukcji zagrożonych wybuchami ze szczególnym uwzględnieniem przemysłu petrochemicznego. Jest to dobre źródło informacji o projektowaniu konstrukcji narażonych na działanie fali uderzeniowej, nie tylko instalacji przemysłowych. W wyczerpujący sposób są w nim omówione również inne aspekty bezpiecznego projektowania infrastruktury krytycznej, takie jak: właściwa lokalizacja, preferowane typy konstrukcji, właściwości materiałów oraz zalecane metody analiz

i projektowania. Zawiera również przykłady, będące wartościowym źródłem wiedzy praktycznej.

W roku 1999 ASCE opublikowało obszerny podręcznik *Structural design for physical security: State of the practice*. Jest to ponad 260-stronicowe podsumowanie obecnego stanu wiedzy i doświadczeń w zakresie projektowania i zabezpieczania konstrukcji przed wybuchami. Zawiera ono szeroki przegląd tematów dotyczących bezpieczeństwa konstrukcji, takich jak ocena i klasyfikacja możliwych zagrożeń oraz kategoryzacja obciążeń powiązanych z konkretnymi zagrożeniami. Osobną część stanowi opis zachowania konstrukcji pod wpływem obciążenia wybuchem ze szczególnym uwzględnieniem drzwi i okien. Dużo miejsca poświęcono w niej zagadnieniom projektowania, w tym również wzmocnienia i modernizacji konstrukcji w celu ich zabezpieczenia przed wybuchem.

Kolejną grupę stanowią publikacje agent rządowych: Departamentu Obrony, Departamentu Energii, Generalnego Urzędu ds. Usług oraz Federalnej Agencji Zarządzania Kryzysowego, powstałe w wyniku licznych inicjatyw mających na celu zwiększenie bezpieczeństwa antyterrorystycznego po spektakularnych, tragicznych w skutkach zamachach terrorystycznych w 2001 roku w Nowym Jorku i Waszyngtonie. Ich wspólną, wartą podkreślenia cechą jest dostępność – wszystkie omówione niżej dokumenty są ogólnie dostępne. Departament Obrony USA opublikował dwie pozycje: *United facilities criteria 4-010-01* [Department of Defence 2003] (ostatnia aktualizacja w 2012 roku) oraz *United facilities criteria 4-023-03* [Department of Defence 2005] (ostatnia aktualizacja w 2010 roku), w których sformułowane są minimalne wymagania co do zabezpieczeń antyterrorystycznych w budynkach. Pierwsza z nich stanowi zbiór 22 norm zawierających wymagania stawiane przez Departament Obrony konstrukcjom budowlanym narażonym na atak terrorystyczny. Stanowią one niejako rozszerzenie norm i kryteriów powszechnie stosowanych w budownictwie amerykańskim. Interesującym uzupełnieniem tej publikacji jest dokument przygotowany przez Korpus Inżynieryjny Armii USA (USACE) *Structural design of type V construction for antiterrorism measures* (PDC TPP-06-01) [U.S. Army Corps of Engineers 2007]. Zawiera on skodyfikowane wymagania co do konstrukcji kratownicowych i ramowych (drewnianych i stalowych) omówionych w UFC 4-010-01. Drugi z wymienionych dokumentów Departamentu Obrony USA (UFC 4-023-03) [Department of Defence 2005] jest poświęcony zapobieganiu lawinowym katastrofom budowlanym (tzw. *progressive collapse*), które są przyczyną największej liczby ofiar w przypadku eksplozji w budynkach lub ich bezpośrednim sąsiedztwie. Podobne opracowanie *Facilities standards for the public buildings service* (PBS-P100) [General Service Administration 2003] opublikował Generalny Urząd ds. Usług – agenda federalna odpowiedzialna za organizację zakupów i usług na rzecz instytucji federalnych w USA. Zawiera ono wymogi stawiane zarówno nowym budynkom służb federalnych USA, jak i obiektom modernizowanym. Departament Energii USA opublikował w latach 80. ubiegłego wieku podręcznik podobny w założeniach i treści do TM-5-1300: *A manual*

for the prediction of blast and fragment loading on structures (DOE/TIC-11268) [U.S. Department of Energy 1992]. Jego ostatnia wersja z roku 1992 zawiera informacje uaktualnione i rozszerzone w stosunku do ostatniej wersji TM-5-1300. W roku 2003 Federalna Agencja Zarządzania Kryzysowego (FEMA 428) w ramach serii Risk management series wydała *Primer to design safe school projects in case of terrorist attacks* [Federal Emergency Management Agency 2003]. Nie jest to typowy podręcznik, lecz zbiór jasnych i wyczerpujących wytycznych projektowania konstrukcji zagrożonych wybuchem. Jest publikacją przeznaczoną szczególnie dla osób, które chcą się nauczyć, jak realizować projekty z uwzględnieniem pasywnej ochrony konstrukcji.

4.3. Norma amerykańska TM 5-1300/UFC 3-340-002

Podstawowym i ogólnodostępnym dokumentem w Stanach Zjednoczonych, regulującym standardy szeroko rozumianego projektowania i konstruowania obiektów budowlanych odpornych na wybuch, jest licząca ponad 1900 stron norma *Structures to resist the effects of accidental explosions* (Konstrukcje odporne na wybuch) [U.S. Department of Army 1990]. Składa się ona z sześciu rozdziałów. Zawiera zbiór przykładów obliczeniowych, obrazujących kluczowe aspekty projektowania, oraz ponad osiemset rysunków i tabel wspomagających decyzje projektowe.

W rozdziale pierwszym określono cel i zakres normy. Podano również: ogólną definicję współczynnika bezpieczeństwa, podział systemów odpornych na wybuch i jego składowe, graniczne wartości wytrzymałości na wybuch systemów ochronnych, ludzi i wyposażenia oraz podstawowe zasady projektowania konstrukcji odpornych na wybuch.

Rozdział drugi w całości jest poświęcony opisowi wybuchu. Podano tam definicję tzw. równoważnika trotylowego, opis wybuchu w przestrzeni otwartej i zamkniętej, opis zjawisk związanych z wybuchem, takich jak ruch odprysków czy wymuszonych przez niego obciążeń impulsowych, np. fali deformacji w podłożu gruntowym. Na końcu rozdziału zamieszczono kilkanaście praktycznych przykładów obliczeń.

W rozdziale trzecim znajduje się opis najważniejszych zasad analiz dynamicznych. Należy podkreślić jego znaczenie, gdyż podczas projektowania konstrukcji budowlanych w Polsce i innych krajach w przeważającej większości wykonuje się obliczenia statyczne, a obliczenia dynamiczne są zastępowane równoważnymi obliczeniami quasi-statycznymi, np. wprowadza się mnożniki dynamiczne. W rozdziale tym wprowadzono funkcję opór elementu–ugięcie, określającą graniczną wytrzymałość elementów konstrukcyjnych na oddziaływanie fali ciśnienia. Podano schematyczne rysunki postaci zniszczenia elementów konstrukcyjnych w zależności od ich geometrii i warunków podparcia oraz uproszczone wzory na obliczanie ich granicznej nośności. Należy pokreślić, że

w wytycznych uwzględniono plastyczny zakres pracy materiału konstrukcyjnego. Rozdział zakończono kilkoma praktycznymi przykładami obliczeniowymi.

Rozdział czwarty w całości jest poświęcony zagadnieniom związanym z projektowaniem konstrukcji żelbetowych usytuowanych nad powierzchnią ziemi i odpornych na wybuch. Podano szczegółowe zasady projektowania żelbetowych płaskich płyt, belek i słupów. Zamieszczone algorytmy obejmują typowe zasady rozmieszczania zbrojenia, ale również ich specjalne układy, zwiększające odporność na wybuch. Są tam również informacje o dynamicznej wytrzymałości betonu, która kilkakrotnie może przewyższać wartość statyczną, oraz wytyczne co do minimalnych wartości wytrzymałości materiałów użytych do wytworzenia elementu konstrukcyjnego. Na zakończenie przytoczono kilkanaście praktycznych przykładów obliczeniowych.

W rozdziale piątym omówiono zasady projektowania konstrukcji i elementów stalowych odpornych na wybuch. Podobnie jak w rozdziale czwartym, podano algorytmy projektowania takich elementów konstrukcyjnych, jak belki, słupy, połączenia, płyty, a także paneli. Zamieszczono również wytyczne projektowania drzwi odpornych na wybuch. Rozdział zakończono kilkoma praktycznymi przykładami obliczeniowymi.

W ostatnim szóstym rozdziale omówiono projektowanie innych niż żelbetowe czy stalowe konstrukcji budowlanych oraz wybranych składowych obiektów budowlanych. Podano zasady projektowania konstrukcji murowych zbrojonych i niezbrojonych, prefabrykowanych elementów żelbetowych (w tym sprężonych), okien, konstrukcji podziemnych, łukowych magazynów przykrytych ziemią, elementów odprowadzających ciśnienie wybuchu z obiektu (wentyli bezpieczeństwa) oraz elementów redukujących amplitudę drgań powstałych wskutek wybuchu. Podobnie jak w pozostałych rozdziałach, na zakończenie podano kilka praktycznych przykładów obliczeniowych.

4.4. Stan przepisów normowych i rozporządzeń w Polsce

Na podstawie przeglądu zespołu norm PN-EN 1991 Eurokod 1-4,6, zawierających regulacje odnośnie do projektowania konstrukcji budowlanych: betonowych, stalowych, zespolonych stalowo-betonowych oraz murowych, stwierdzono, że brak jest w nich jakichkolwiek wytycznych projektowania konstrukcji budowlanych z uwzględnieniem oddziaływań spowodowanych eksplozjami materiałów wybuchowych. Mimo że obciążenie wybuchem mieści się w zakresie normy PN-EN 1991 Eurokod 1 jako obciążenie wyjątkowe, to w rozdziale 1 pkt. 1.1 (6) jest komentarz, że norma w szczególności „*nie dotyczy oddziaływań wyjątkowych, spowodowanych eksplozjami zewnętrznymi, działaniami wojennymi i akcjami terrorystycznymi*”. Wbrew cytowanemu ograniczeniu część zapisów może być jednak wykorzystana do określania oddziaływań eksplozji materiałów wybuchowych.

W szczególności godny uwagi jest rozdział trzeci normy PN-EN 1991 Eurokod 1. W punkcie 3.1 wyróżniono dwie grupy strategii stosowanych w wyjątkowych sytuacjach obliczeniowych. Pierwsza grupa strategii dotyczy projektowania konstrukcji, która zapewni przeniesienie oddziaływań określonych co do typu oraz miejsca. Druga grupa natomiast ma na celu ograniczenie zasięgu zniszczenia miejscowego, gdy specyfika oddziaływania uniemożliwia określenie jego typu i miejsca. Proponowane strategie są aktualne w odniesieniu do eksplozji materiałów wybuchowych.

Gdy konstrukcja obiektu oraz systemy kontroli dostępu pozwalają wskazać miejsca potencjalnego wybuchu, można przyjąć, że obciążenie jest określone, i stosować strategię, zgodnie z którą przyjmuje się odpowiednią nośność konstrukcji w tych miejscach. W przeciwnym wypadku należy dążyć do ograniczenia zasięgu zniszczenia miejscowego. Zgodnie z normą PN-EN 1991 Eurokod 1, zniszczenie miejscowe spowodowane oddziaływaniami wyjątkowymi można zaakceptować, jeśli nie zagrazi ono stateczności całej konstrukcji, będzie zapewniona całkowita nośność konstrukcji i możliwość podjęcia niezbędnych działań ratowniczych. Podano trzy sposoby osiągnięcia tego celu. Pierwszy polega na projektowaniu elementów kluczowych tak, aby ich nośność zapewniła przeniesienie modelowanych skutków oddziaływania wyjątkowego. Model skupionego lub rozłożonego obciążenia może być zdefiniowany w załączniku krajowym. Drugi sposób polega na projektowaniu całej konstrukcji tak, aby w razie zniszczenia miejscowego stateczność całej konstrukcji lub znacznej jej części nie była zagrożona. Akceptowalne ograniczenie zniszczenia miejscowego spowodowanego uszkodzeniem elementu konstrukcyjnego (wyrażone w procentach lub wielkością powierzchni) można ustalać według zasad podanych w załączniku krajowym. Trzeci sposób polega na zastosowaniu normatywnego projektowania, w którym jest określona akceptowalna odporność konstrukcji. Wszystkie trzy sposoby wymagają natomiast określenia wartości i zasięgu oddziaływania eksplozji materiałów wybuchowych. Strategia oparta na ograniczeniu zasięgu zniszczenia miejscowego przez takie zaprojektowanie elementu kluczowego, by przeniósł obciążenie wybuchem, wymaga podania metod oceny wyężenia tego elementu lub wytycznych projektowych, które zapewnią jego odpowiednią wytrzymałość. Powyższe informacje powinny być dodane do zespołu norm jako załączniki krajowe.

Według normy PN-EN 1991 Eurokod 1 w obliczeniach należy ponadto uwzględnić oddziaływania wyjątkowe (p. 3.2), biorąc pod uwagę środki podjęte w celu ich wyeliminowania, prawdopodobieństwo wystąpienia, konsekwencje zniszczenia, percepcję społeczną oraz poziom akceptowalnego ryzyka, który można określić za pomocą takich czynników, jak potencjalna liczba ofiar, konsekwencje ekonomiczne, koszt działań zabezpieczających itd. W normie przewidziano jednocześnie określenie dopuszczalnego poziomu ryzyka według załącznika krajowego jako niesprzecznej informacji uzupełniającej. Ze względu na powyższe celowe jest opracowanie szczegółowej procedury oceny zagrożenia

wybuchem dla całego obiektu oraz jego poszczególnych elementów (np. pomieszczeń). Procedura oceny mogłaby być oparta na istniejących wytycznych klasyfikacji gazowych przestrzeni wybuchowych [PN-EN 60079-10, część 10-1]. Mimo że wszystkie procedury dotyczą wybuchu pyłów, prezentowana metodologia mogłaby być użyta do pomieszczeń i elementów konstrukcji narażonych na eksplozję ładunków wybuchowych (przy określaniu zasięgu fali nadciśnienia z powodu braku wytycznych autorzy normy stosują analogię do wybuchu TNT, co wskazuje na możliwość adaptacji tych przepisów do eksplozji ładunków wybuchowych). W szczególności godne uwagi są zaprezentowany zakres oceny zagrożenia, szczegółowy schemat postępowania przy ocenie zagrożenia, wzorce dokumentacji służące do opisu zagrożenia oraz arkusz oceny ryzyka.

Przy tworzeniu wytycznych pozwalających uwzględnić oddziaływanie spowodowane eksplozją materiałów wybuchowych celowe jest dopasowanie używanych strategii obliczeniowych do przewidywanych konsekwencji zniszczenia. Zgodnie z normą PN-EN 1991 Eurokod 1, można wyróżnić trzy klasy zniszczenia: CC1 (małe konsekwencje zniszczenia, brak dodatkowych analiz uwzględniających oddziaływanie wyjątkowe), CC2 (średnie konsekwencje zniszczenia, uproszczona analiza na podstawie modelu statycznego oddziaływania równoważnego lub projektowanie normatywne), CC3 (duże konsekwencje zniszczenia, wymagana analiza szczegółowa). Należy zmierzać do stworzenia wytycznych co do eksplozji materiałów wybuchowych, analogicznie do załącznika D normy PN-EN 1991 Eurokod 1 opracowanego dla wybuchów pyłów i gazów, oraz uzupełnienia zaleceń projektowych zawartych w p. 5.1 tej samej normy.

Po przeanalizowaniu norm dotyczących projektowania konstrukcji stalowych, żelbetowych, betonowych, zespolonych konstrukcji stalowo-betonowych oraz konstrukcji murowych [PN-EN 1991 Eurokod 2-4,6] stwierdzono, że nie ma wytycznych do projektowania z uwzględnieniem pasywnej ochrony cywilnych obiektów infrastruktury krytycznej i ochrony elementów krytycznych narażonych na ataki terrorystyczne lub inne oddziaływania wyjątkowe, takie jak eksplozja lub detonacja materiału wybuchowego. Jednak w PN-EN 1991 Eurokod 1, 2 oraz 6 rozważa się skutki eksplozji np. gazu i pyłów w silosach. Podane tam zasady i klasyfikacja oraz terminologia są opisane w rozdziale 2 tej normy. Reguły te mogą stanowić punkt wyjścia do wprowadzenia definicji, klasyfikacji oddziaływań oraz opracowania ogólnych zasad projektowania z uwzględnieniem zagrożenia spowodowanego eksplozją materiałów wybuchowych.

Literatura

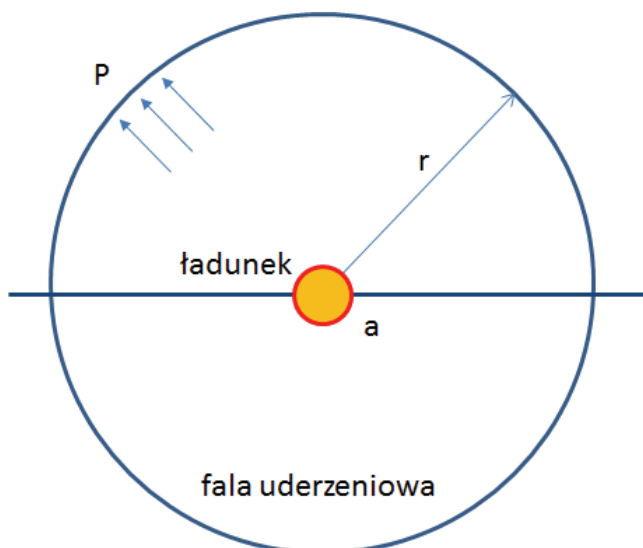
- Agabian M.S. (1985), *Design of structures to resist nuclear weapons effects* (Manual of Practice No. 42), American Society of Civil Engineers.
- Bounds W.L. (2010), *Design of blast-resistant buildings in petrochemical facilities*, American Society of Civil Engineers.

- Coltharp D.R., Vitayaudom K.P., Kiger S.A. (1985), *Semihardened facility design criteria improvement*, Engineering & Services Laboratory, Air Force Engineering & Services Center, 164.
- Department of Defense (2005), *United facilities criteria. Design of buildings to resist progressive collapse* (UFC 4-023-03).
- Department of Defense (2003), *United facilities criteria. Minimum antiterrorism standards for buildings* (UFC 4-010-01).
- Federal Emergency Management Agency (2003), *Risk management series: Primer to design safe school projects in case of terrorist attacks*.
- General Service Administration (2003), *Facilities standards for the public buildings service* (PBS-P100).
- Krauthammer T., Marchand K.A., Mlakar P.F., Conrath E.J. (1999), *Structural design for physical security: State of the practice*, American Society of Civil Engineers.
- Krauthammer T., DeSutter M.A. (1989), *Analysis and design of connections, openings and attachments for protective construction*, Final Report No. WL-TR-89-44, Weapons Laboratory, Air Force Systems Command, Kirtland AFB, New Mexico, U.S.A.
- Krauthammer T. (1999), Structural concrete and steel connections for blast resistant design, *International Journal of Impact Engineering*, vol. 22, no. 9-10, s. 887–910, October/November.
- Ku C.K., Krauthammer T. (1999), Numerical assessment of reinforced concrete knee-joints under explosively applied loads, *ACI Structural Journal*, vol. 96, no. 2, s. 239–247.
- Otani R.K., Krauthammer T. (1997), Assessment of reinforcing details for blast containment structures, *Structural Journal, ACI*, vol. 94, no. 2, s. 124–132.
- U.S. Army Corps of Engineers (2007), *Structural design of type V construction for antiterrorism measures* (PDC TPP-06-01).
- U.S. Department of Energy (1992), *A manual for the prediction of blast and fragment loading on structures*, DOE/TIC 11268. Washington, DC, Headquarters, U.S. Department of Energy.
- U.S. Department of the Army (1986), *Fundamentals of protective design for conventional weapons*, TM 5-855-1. Washington, DC, Headquarters, U.S. Department of the Army.
- U.S. Department of the Army (1990), *Structures to resist the effects of accidental explosions*, Army TM 5-1300, Navy NAVFAC P-397, AFR 88-2. Washington, DC, Departments of the Army, Navy and Air Force.

5. Ciśnienie powstające w wyniku eksplozji oraz jego rozkład w czasie i przestrzeni

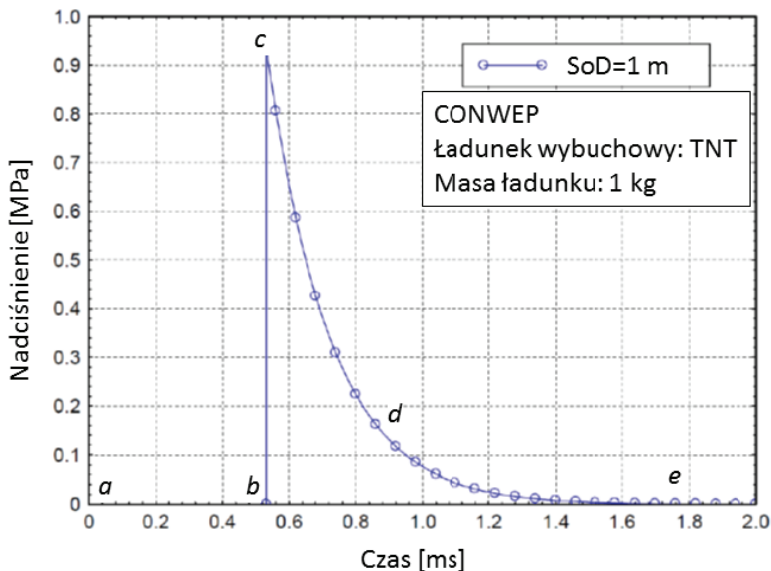
5.1. Przebieg eksplozji

Prezentację rozkładu ciśnienia na przegrodach, powstałego w wyniku eksplozji, należy poprzedzić omówieniem podstawowych właściwości wybuchu. Według definicji wybuch jest zjawiskiem szybkiej, fizycznej, chemicznej lub jądrowej przemiany układu, której towarzyszy zmiana energii potencjalnej w pracę mechaniczną wykonywaną przez rozprężające się gazy. Inaczej mówiąc, wybuch to gwałtowne wydzielenie się w jednym miejscu i czasie dużych ilości energii.



Rys. 5.1. Ładunek i fala uderzeniowa

Głównym składnikiem każdej eksplozji (rys. 5.1) jest paliwo lub ładunek (a), np. TNT. Po zapaleniu ładunek gwałtownie uwalnia energię w postaci ciepła, dźwięku i fali ciśnienia (P). Fala ciśnienia rozchodzi się, tworząc w każdej chwili miejsce o najwyższym ciśnieniu – krawędź, zwaną falą uderzeniową – w pewnej odległości (r) od wybuchu. Dopóki fala nie napotka na swojej drodze żadnych obiektów i nie wystąpi odbicie, jej rozchodzenie się w powietrzu ma przebieg idealny. Ten przebieg, zwany krzywą nadciśnienia, można zobrazować za pomocą wykresu (rys. 5.2).



Rys. 5.2. Rozkład ciśnienia w czasie

W naturalnych warunkach fala uderzeniowa wraz ze związanym z nią podwyższonym ciśnieniem odbija się od powierzchni w różnych kierunkach, powodując zmiany ciśnienia w danych punktach. Fala odbita kształtem przypomina falę uderzenia, ma jednak większą wartość szczytową. Wartość ta zależy od wielkości fali padającej oraz kąta padania na powierzchnię.

Wzrost szczytu ciśnienia fali odbitej w stosunku do fali padającej można wyrazić wzorem:

$$P_{ra} = C_{ra} \cdot P_{so} \quad (5.1)$$

gdzie: P_{ra} – ciśnienie fali odbitej,

P_{so} – ciśnienie fali padającej,

C_{ra} – współczynnik odbicia, przyjmuje on wartości od 2 do 20 (więcej szczegółów czytelnik znajdzie w dalszej części rozdziału).

Można stwierdzić, że fala uderzeniowa, napotykając na swojej drodze przeszkody, kumuluje w ich sąsiedztwie energię. Właśnie to zjawisko jest przyczyną niszczenia obiektów znajdujących się w zasięgu działania wybuchu.

Warto w tym miejscu zaznaczyć, że nawet wybuchy o małej sile, nie powodującej uszkodzeń konstrukcji budynków, mogą być tragiczne w skutkach. Wynika to z faktu, że największym zagrożeniem podczas wybuchu są odłamki szkła. Powodują one 80% wszystkich urazów organizmu ludzkiego związanych z wybuchami w budynkach. Nawet jeśli dany budynek nie jest celem, fale uderzeniowe, rozchodząc się we wszystkich kierunkach, powodują na swojej drodze

spore zniszczenia, głównie takich elementów, jak szyby w oknach, przeszklone drzwi itp. Dlatego w coraz większej liczbie obiektów montuje się okna wyposażone w specjalne folie utrzymujące kawałki szkła bezpiecznie wewnątrz ramy okiennej. Dzięki temu obrażenia i szkody wywołane potłuczonymi odłamkami szkła są znacznie mniejsze.

5.2. Ocena rozkładu ciśnień w wyniku eksplozji

5.2.1. Klasyfikacja materiałów wybuchowych

Można wyróżnić dwa rodzaje materiałów wybuchowych w zależności od prędkości propagacji fali uderzeniowej, a mianowicie „wysoko wybuchowe”, jeśli detonacja jest naddźwiękowa, i „nisko wybuchowe”, gdy proces spalania jest wolniejszy. Materiały wybuchowe według stanu skupienia mogą być klasyfikowane jako ciała stałe, ciecze i gazy. Skutki wybuchu materiałów w postaci ciała stałego są najlepiej rozpoznane. W zależności od wrażliwości na zapłon rozróżnia się podrzędne i główne materiały wybuchowe. Te ostatnie mogą łatwo eksplodować po zapłonie od iskry, płomienia lub uderzenia. Podrzędne materiały wybuchowe po zdetonowaniu tworzą falę uderzeniową, która może spowodować duże zniszczenia w najbliższym otoczeniu. Najczęściej eksplozje są wynikiem reakcji chemicznych.

Pierwszy materiał wybuchowy został wynaleziony w IX wieku w Chinach i był znany jako czarny proszek. W dobie rewolucji przemysłowej w XVIII i XIX wieku nastąpił szybki rozwój chemii i wymyślono nowe materiały wybuchowe. Można tutaj wymienić nitroglicerynę, nitrocelulozę, bezdymny proszek i prawdopodobnie najbardziej znany, wynaleziony przez Alfreda Nobla, dynamit. Po drugiej wojnie światowej jednym z najpopularniejszych materiałów wybuchowych stał się trinitrotoluen, nazywany krótko TNT. Jest to wysoko wybuchowy, stały materiał koloru żółtego. Jest wtórnym materiałem wybuchowym, w którym zapłon następuje w wyniku reakcji chemicznej. Liczne zastosowania TNT spowodowały, że przyjmuje się go za standardową miarę siły wybuchu.

5.2.2. Klasyfikacje fali uderzeniowej

W zależności od ograniczenia ładunku wybuchowego wyróżnia się wybuch nieograniczony i ograniczony. Te dwie kategorie mogą być podzielone na sześć podkategorii na podstawie położenia materiału wybuchowego i typu konstrukcji. Na rysunku 5.3 przedstawiono pełną klasyfikację.



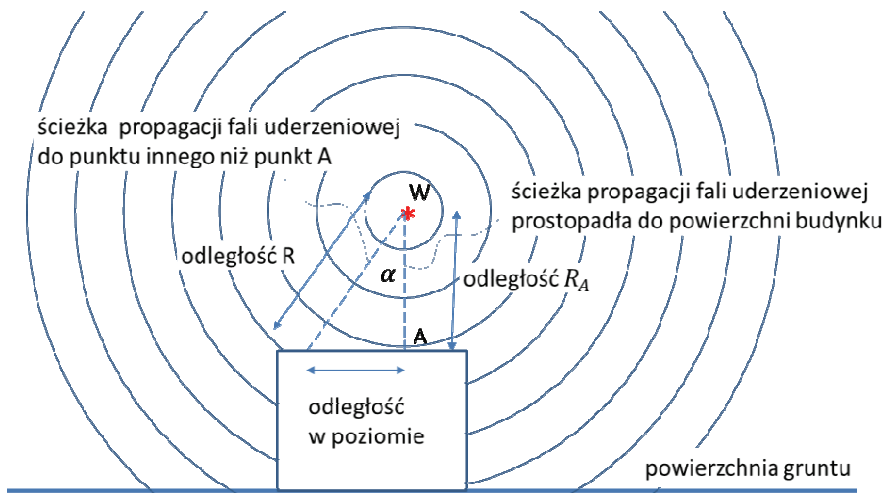
Ograniczenie ładunku	Kategoria	Obc. Ciśnieniem	Konstrukcja
wybuch nieograniczony	1. w powietrzu	a. nieodbite	schron
	2. nad powierzchnią	b. odbite	
	3. powierzchniowy		
wybuch ograniczony	4. wentylowany	c. ciśnienie wewn. d. wyciek ciśnienia	bariera
	5. częściowo ograniczony	c. ciśnienie wewn. e. ciśnienie gazu d. wyciek ciśnienia	
	6. w pełni ograniczony	c. ciśnienie wewn. e. ciśnienie gazu we- wn.	W pełni zamknięty obiekt

Rys. 5.3. Kategorie obciążenia wybuchem

Nieograniczony wybuch w powietrzu oraz wybuch powierzchniowy są bardzo ważne, ponieważ wywołują tzw. idealną falę uderzeniową. Spośród sześciu kategorii te powstałe wskutek wybuchów w powietrzu są rzadko spotykane i są najmniej prawdopodobne. Pozostałe cztery kategorie obciążenia wybuchem występują znacznie częściej (np. w fabrykach niebezpiecznych związków wybuchowych oraz w halach magazynujących ładunki wybuchowe).

Na rysunku 5.3 pokazano pięć możliwości obciążenia ciśnieniem, związanych z kategoriami obciążenia wybuchem, a także miejsce ładunku wybuchowego i konstrukcje ochronne poddane tym obciążeniom.

Eksplzje nieograniczone. W wyniku wybuchu, który następuje w powietrzu, powstaje fala uderzeniowa, która rozchodzi się od centrum wybuchu i bez przeszkód dociera do celu jako fala niewzmocniona (rys. 5.4). Dopiero po odbiciu fali od konstrukcji ulega ona wzmocnieniu.



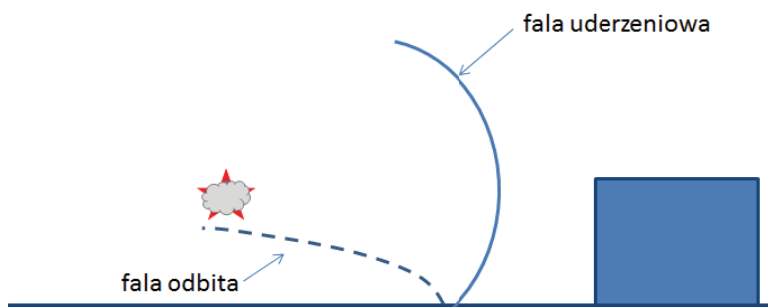
Rys. 5.4. Wybuch w wolnej przestrzeni

Zmiana ciśnienia fali i impulsu na powierzchni konstrukcji jest funkcją kąta padania. Kąt ten utworzy linia, która wyznacza odległość normalną R_A pomiędzy punktem detonacji a konstrukcją, oraz odległość R propagacji fali pomiędzy centrum eksplozji a dowolnym punktem konstrukcji (rys. 5.4).

Wartość nadciśnienia fali odbitej może być znacznie większa niż nadciśnienia fali padającej. Przy bardzo silnych wybuchach, do których teoria gazów doskonałych nie ma zastosowania, przewidywana wartość ciśnienia fali odbitej może być aż 20 razy większa od wartości ciśnienia fali padającej. Oznacza to, że obiekty wokół analizowanej konstrukcji mogą stworzyć fale odbite, które obciążają konstrukcję ciśnieniem o znacznie większej wartości. Ponadto, może też wystąpić tak zwany efekt wzmocnienia w narożach konstrukcji, gdzie może oddziaływać wiele nakładających się fal odbitych [Mougeotte i in. 2010].

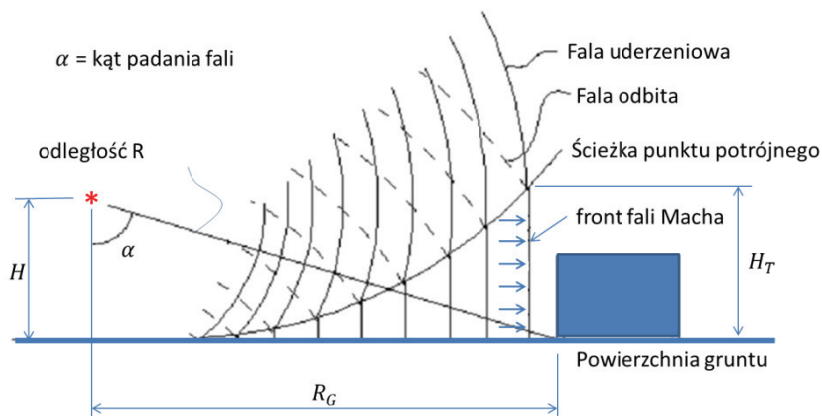
Eksplozja w powietrzu. Punkt eksplozji w powietrzu znajduje się w pewnej odległości od konstrukcji, powyżej jej poziomu, w związku z czym fala odbita od ziemi dociera do konstrukcji przed nadejściem fali uderzeniowej. Gdy fala padająca jest wzmocniona wskutek odbicia od ziemi, mogą wystąpić dwa zjawiska: klasyczne odbicie (rys. 5.5) lub wzmocnione odbicie (tzw. fala Macha, rys. 5.6).

Fala Macha powstaje pomiędzy falą padającą a falą odbitą. Fala odbita powstaje w wyniku wzmocnienia fali padającej na powierzchni gruntu, a wzmocnienie to zależy od kąta padania między ziemią a falą padającą. Krytyczny kąt padania wynosi około 40° (gdy kąt jest mniejszy od 40° występuje odbicie klasyczne). Zmiana ciśnienia fali Macha jest podobna do zmiany ciśnienia fali padającej, ale wartość ciśnienia jest nieco większa.



Rys. 5.5. Wybuch w wolnej przestrzeni – wybuch na powierzchni

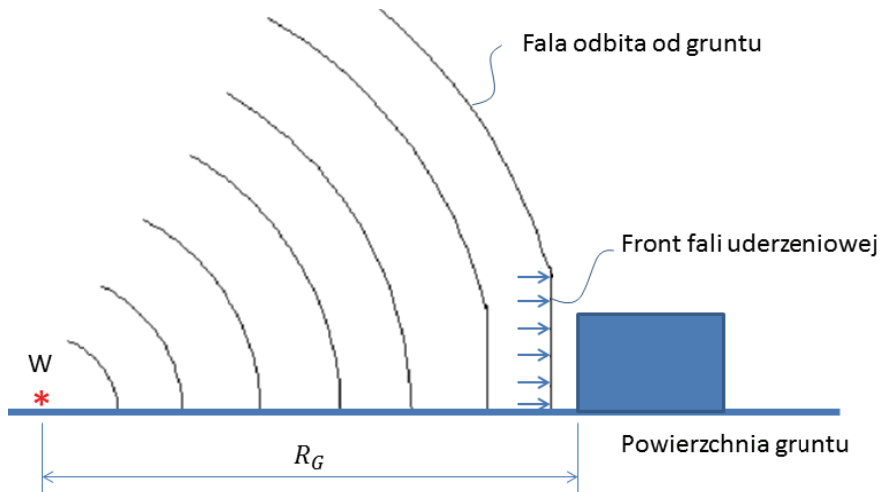
Eksplzja powierzchniowa. Wybuch powierzchniowy występuje podczas detonacji ładunku znajdującego się w pobliżu lub na powierzchni ziemi. Początkowo fala uderzeniowa jest odbijana i wzmacniana przez powierzchnię gruntu i powstaje fala odbita. W przeciwieństwie do eksplozji w powietrzu, fala odbita łączy się z falą padającą w punkcie detonacji, tworząc jedną falę w kształcie półkuli, podobną do fali Macha (rys. 5.7).



Rys. 5.6. Wybuch w wolnej przestrzeni – odbicie wzmacnione

Eksplzja ograniczona. Wybuchy ograniczone stanowią bardzo złożone zjawiska. Kiedy wybuch zachodzi wewnątrz budynku, ściany i sufit znacznie zwiększają liczbę interakcji pomiędzy falą a konstrukcją. Występują tu wielokrotne odbicia, a fale łączą się i wzmacniają w narożach i innych lokalnych przewężeniach konstrukcji. Odbicia mogą spowodować duży wzrost szczytowych wartości ciśnienia w stosunku do wartości początkowych. Ponadto, w zależności od stopnia ograniczenia wysoka temperatura i produkty gazowe wytworzone w procesie chemicznym wywierają dodatkowe ciśnienie i wydłuża-

ją czas działania obciążenia na konstrukcje. Najważniejszą różnicą między wewnętrzną a zewnętrzną eksplozją jest jednak występowanie quasi-statycznego ciśnienia gazu.



Rys. 5.7. Ograniczony wybuch powierzchniowy

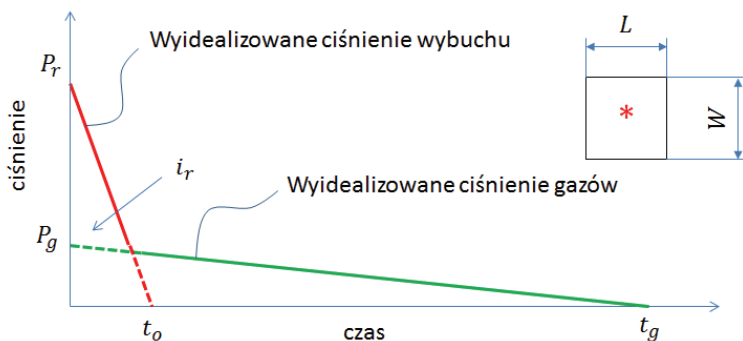
W zależności od względnej wielkości masy ładunku wybuchowego i objętości budynku ciśnienie gazu może stanowić dominujące obciążenie elementów budowlanych. Ponieważ budynki (oprócz budynków zamkniętych) mają drzwi, okna, kanały grzewcze itp., które pozwalają na wymianę gazów z sąsiednimi pomieszczeniami lub z powietrzem na zewnątrz budynku, ciśnienie wewnątrz nie jest jednorodne. Rozkład ciśnienia odbywa się w przedziale czasowym o wiele dłuższym niż czas propagacji fali padającej i odbitej, a całkowity czas rozkładu jest zazwyczaj znacznie dłuższy niż czas odpowiedzi konstrukcji na obciążenie. W związku z tym rozkład ciśnienia gazu jest procesem quasi-statycznym.

Gdy wybuch występuje w przestrzeni zamkniętej, gromadzą się produkty gazowe i temperatura w pomieszczeniu rośnie, w ten sposób powstaje ciśnienie wybuchu, które jest mniejsze niż ciśnienie fali uderzeniowej, ale utrzymuje się znacznie dłużej. Ciśnienie gazu w pomieszczeniu, a także długość impulsu ciśnienia t_g zależą od wielkości otworów wentylacyjnych w strukturze.

Na rysunku 5.8 pokazano wyidealizowaną krzywą zmiany ciśnienia w czasie, uwzględniającą zarówno ciśnienie fali uderzeniowej, jak i ciśnienie gazu. Gdy czas trwania ciśnienia gazu zbliża się do czasu trwania ciśnienia wybuchu, konstrukcja jest uważana za całkowicie wentylowaną.

Eksplozja w pomieszczeniu w pełni wentylowanym. Eksplozje wewnętrzne, gdy źródło wybuchu znajduje się w bezpośrednim sąsiedztwie przegrody, lub

wybuchy w konstrukcjach otwartych na jednej lub większej liczbie powierzchni można opisać jednym mechanizmem. Po detonacji pierwotna fala jest wzmacniana przez odbicie od sztywnych fragmentów konstrukcji. Ponadto gazowe produkty detonacji ekspandują w całości do atmosfery i nie wytwarzają ciśnienia gazu P_d . W wyniku spalania i swobodnego rozprężania gazów powstaje ciśnienie fali uderzeniowej, która rozchodzi się w otwartej przestrzeni.



Rys. 5.8. Zestawienie rzeczywistego i wyidealizowanego ciśnienia wybuchu gazu w małym pomieszczeniu

Eksplzja częściowo ograniczona. Częściowo ograniczona eksplozja wytwarzana jest wewnątrz bariery lub konstrukcji z ograniczoną liczbą otworów i/lub powierzchni odkształcalnych i łamiwych. Początkowa fala, która jest wzmacniana przez łamiwe i sztywne części konstrukcji, oraz produkty detonacji są odprowadzane do atmosfery w pewnym, skończonym czasie. Zgromadzone produkty detonacji (gaz o wysokiej temperaturze) wytwarzają quasi-statyczne ciśnienie gazu.

Eksplzja całkowicie ograniczona. W pełni ograniczony wybuch to wybuch wytworzony wewnątrz całkowicie zamkniętego budynku. Charakteryzuje się on długim czasem trwania ciśnienia gazu, które jest funkcją stopnia szczelności.

5.3. Rozkład obciążeń na przegrodzie

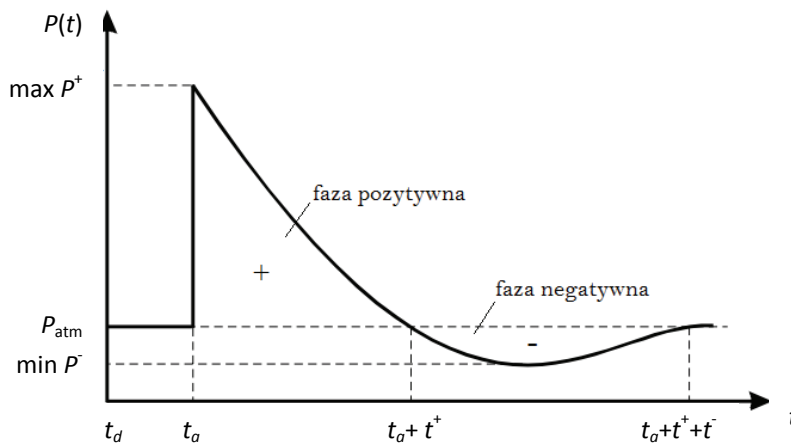
5.3.1. Skutek fali uderzeniowej

Fala uderzeniowa składa się z wysoce skompresowanego powietrza rozchodzącego się radialnie ze źródła z naddźwiękową prędkością. Szybka ekspansja produktów detonacji, mierzona zwykle w milisekundach, tworzy falę uderzeniową w otaczającym medium: w powietrzu (wybuchy powietrzne – ang. *blast waves*), w cieczy (wybuchy podwodne – ang. *fluid waves*) lub w gruncie (wybuchy naziemne i podziemne – ang. *ground waves*). Spowodowana wybuchami

powietrznymi fala uderzeniowa (podobna do fali detonacji) charakteryzuje się nieciągłym wzrostem ciśnienia, gęstości, temperatury i prędkości fali uderzeniowej. Wstrząsy wywołane kompresją otaczającego powietrza prowadzą do wzrostu temperatury przed czołem fali. Przed- i powstrząsowe stany są opisywane równaniami zachowania masy, pędu i energii, łącznie zwanymi równaniami skoku Rankine’a-Hugoniota.

W procesie detonacji zachodzi bardzo szybka, stabilna reakcja chemiczna, która prowadzi do eksplozji materiału z ponaddźwiękową szybkością, nazywaną prędkością wybuchu. Prędkość wybuchu większości wysoko wybuchowych materiałów mieści się w granicach od 6700 do 8500 m/s. Fala wybuchu szybko przekształca materiał o stałej konsystencji w gorący (ok. 3000–4000°C [Ngo i in. 2007]), gęsty i wysoko sprężony gaz. Zwiększająca się objętość gazu jest źródłem silnej fali uderzeniowej w powietrzu. Ciśnienie powstałe zaraz za frontem fali uderzeniowej mieści się w granicach od 19000 do 33800 MPa. Tylko około jedna trzecia całości energii chemicznej zawartej w większości wysoko wybuchowych materiałów jest uwalniana w procesie detonacji. Pozostałe dwie trzecie energii są uwalniane w dużo wolniejszym procesie spalania w powietrzu, który ma niewielki wpływ na falę uderzeniową.

Moc wybuchu zależy od postaci impulsu ciśnienia powstającego w wyniku dotarcia fali uderzeniowej do celu. Na rysunku 5.9 przedstawiono typową krzywą zależności ciśnienia od czasu dla impulsu ciśnienia powstałego w pewnej odległości od centrum wybuchu.



Rys. 5.9. Impuls ciśnienia fali uderzeniowej

Ciśnienie powstające na powierzchniach padania fali często jest nazywane ciśnieniem statycznym lub bocznym, co związane jest ze stosowaną metodą pomiaru – wskaźniki wewnątrz zamkniętej rury rejestrują ciśnienie na jej ścianach równoległych do kierunku działania wybuchu.

Przebieg zmian impulsu ciśnienia fali uderzeniowej opisują następujące parametry:

P_{atm} – ciśnienie otoczenia, np. ciśnienie atmosferyczne,

t_d – czas detonacji,

t_a – czas dotarcia fali uderzeniowej do celu,

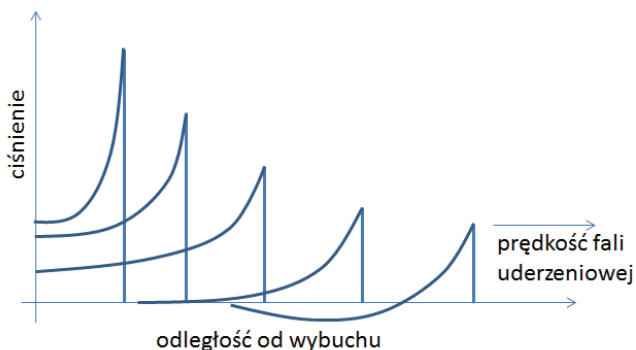
t^+ – czas trwania fali pozytywnej ($P(t) > P_{\text{atm}}$),

t^- – czas trwania fali negatywnej ($P(t) < P_{\text{atm}}$),

$\max P^+$ – maksymalna szczytowa wartość nadciśnienia,

$\min P^-$ – minimalna wartość podciśnienia.

Z rysunku 5.9 wynika, że detonacja tworzy falę uderzeniową o niemal natychmiastowym wzroście ciśnienia do wartości szczytowego nadciśnienia $\max P^+$ z wartości ciśnienia atmosferycznego P_{atm} . Następnie czoło wstrząsu zanika wykładniczo z powrotem do wartości ciśnienia otoczenia i przechodzi w podciśnienie. Czas, w którym ciśnienie $P(t)$ przyjmuje wartości większe niż P_{atm} , jest nazywany pozytywną fazą działania impulsu, a gdy jest mniejsze – fazą negatywną. Zazwyczaj faza negatywna trwa znacznie dłużej niż pozytywna, jednak wartość ekstremalna podciśnienia jest wielokrotnie mniejsza niż nadciśnienia. W związku z powyższym faza negatywna ma niewielki wpływ na zachowanie obiektów – celów wybuchu i podczas projektowania konstrukcji budowlanych jest najczęściej całkowicie pomijana.



Rys. 5.10. Propagacja fali uderzeniowej

- Analizując propagację fali (rys. 5.10), można zaobserwować następujące cechy:
- siła fali słabnie (nadciśnienie stopniowo się obniża),
 - następuje wydłużenie czasu trwania impulsu,
 - następuje spadek prędkości.

Zjawisko to spowodowane jest sferyczną dywergencją, jak również tym, że reakcja chemiczna zostaje zakończona.

Krzywa pokazująca zmianę fali uderzeniowej nadciśnienia jest ważna z punktu widzenia inżyniera budownictwa, ponieważ na jej podstawie można określić ci-

śnienie dynamiczne, które oddziałuje na konstrukcję. Obciążenie konstrukcji eksplozją wysoko wybuchowego materiału zależy od wielu czynników:

- wielkości eksplozji,
- lokalizacji eksplozji w stosunku do badanej konstrukcji (ograniczone i nieograniczone wybuchy),
- geometrii konstrukcji,
- orientacji konstrukcji w stosunku do eksplozji (powyżej gruntu, na powierzchni lub pod ziemią).

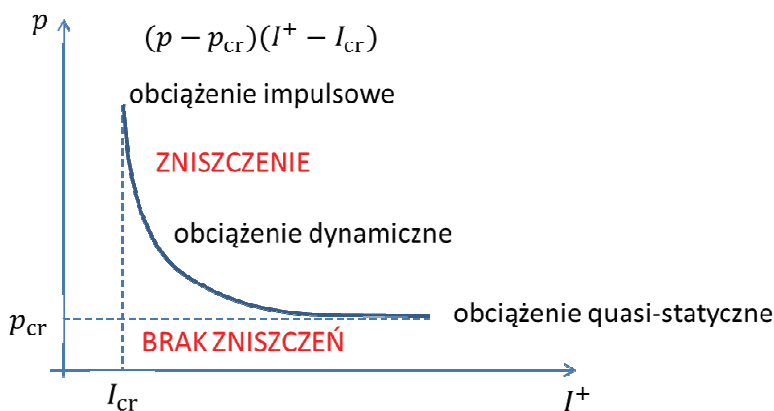
Z eksperymentów wynika, że w każdym przedziale ciśnienia istnieje pewna prędkość cząstek lub powietrza związana z falą uderzeniową, która wywołuje ciśnienie dynamiczne na powierzchni obiektów znajdujących się na drodze fali. W niezabudowanej przestrzeni ciśnienia dynamiczne są zasadniczo funkcją gęstości cząstek i prędkości powietrza. W typowych warunkach można ustalić standardowe związki pomiędzy szczytowym ciśnieniem fali uderzeniowej, szczytową wartością ciśnienia dynamicznego, prędkością cząstek i gęstością powietrza za czołem fali. Ciśnienie dynamiczne, prędkość cząstek i gęstość powietrza są funkcją wyłącznie ciśnienia szczytowego padającej fali, a zatem są to wielkości niezależne od wielkości wybuchu.

Podsumowując, należy powiedzieć, że wielkość ładunku wybuchowego i materiał, z którego jest on wykonany, a także odległość od punktu detonacji do konstrukcji i kształt ładunku determinują wielkość i kształt krzywej nadciśnienia. Ponadto fala uderzeniowa i wytworzone ciśnienie mogą się odbijać od powierzchni (np. ziemi lub struktur) w różnych kierunkach i powodować dalsze zmiany (wzmocnienie) ciśnienia w punkcie. Wzmocnienie fali uderzeniowej opisano nieco dokładniej w następnym podrozdziale.

W praktyce inżynierskiej do oceny niebezpieczeństwa wybuchu i uszkodzenia struktury wprowadza się dodatkowy parametr I^+ – impuls dodatni, definiowany jako pole pod wykresem $P(t)$ aproksymowane numerycznie, np. metodą trapezów. Impuls dodatni oblicza się ze wzoru:

$$I^+ = \int_{t_a}^{t_a+t^+} (P(t) - P_{\text{atm}}) dt \quad (5.2)$$

Oddziaływanie dodatniej fazy impulsu ciśnienia na konstrukcje budowlane zależy od mocy eksplozji i może mieć różną postać: od zmiany stanu naprężenia i stopnia wyężenia elementów (prowadzącego do lokalnych deformacji plastycznych) do utraty stateczności globalnej i całkowitego zniszczenia. Do oceny skutków wybuchu służy stosunek wartości granicznej ciśnienia i impulsu do wartości pomierzonych eksperymentalnie lub oszacowanych empirycznie. Powyższą metodą wyznacza się zakres bezpiecznej pracy konstrukcji w formie diagramów $P - I$ (rys. 5.11).



Rys. 5.11. Diagram $P - I$

Z rysunku 5.11 wynika, że nośność konstrukcji zależy bezpośrednio od postaci impulsu I , a dokładniej od maksymalnej wartości ciśnienia i czasu trwania. Przybliżoną charakterystykę impulsu wyznacza się w zależności od następujących parametrów:

- mocy wybuchu, zależnej od rodzaju i ilości materiałów wybuchowych,
- lokalizacji detonacji względem struktury,
- wzmocnienia ciśnienia przez interakcje z podłożem i przeszkodami.

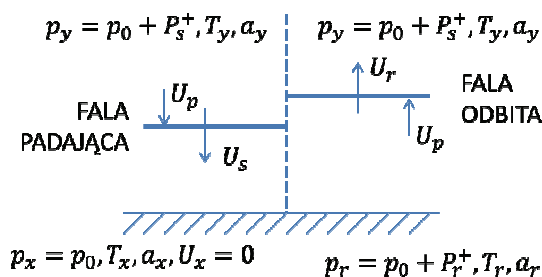
Mając powyższe dane, można wyznaczyć wartości p oraz I^+ z monogramów lub numerycznie z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania typu ConWep, AtBlast itp.

5.3.2. Wpływ odbicia fali

W przypadku wybuchów nadziemnych fala uderzeniowa może natrafić na swojej drodze na przeszkody i ulec odbiciu, szczególnie w obszarach silnie zurbanizowanych. Fala uderzeniowa po odbiciu zawsze ulega wzmocnieniu, a wzmocnienie to jest nieliniowe i zależy od mocy wybuchu i kąta padania fali β . Schematyczny rozwój fali uderzeniowej przedstawiono na rys. 5.7.

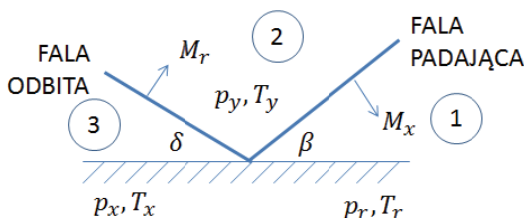
Można wyróżnić trzy podstawowe formy odbicia:

1. Odbicie normalne ($\beta = 0^\circ$) o maksymalnej wartości, gdy fala dociera do powierzchni prostopadłej do kierunku padania (rys. 5.12).



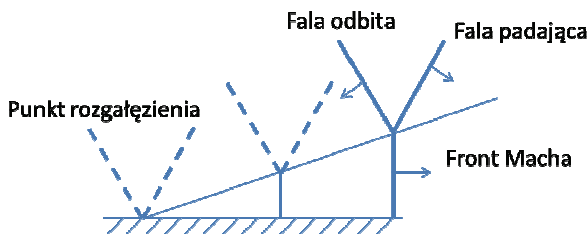
Rys. 5.12. Schematyczne przedstawienie odbicia normalnego; p_x, p_r, p_y – ciśnienie szczytowe fali padającej, odbitej oraz wartość uwzględniająca zmianę temperatury ośrodków w wyniku reakcji spalania produktów wybuchu, p_0 – ciśnienie atmosferyczne, U_p, U_x, U_r – prędkości początkowe cząstek ośrodków oraz prędkości po wybuchu, T_x, T_r, T_y – początkowe temperatury ośrodków oraz końcowa po wybuchu, a_x, a_y, a_r – prędkość dźwięku w ośrodkach oraz prędkość po wzroście temperatury do wartości T_y wskutek działania wybuchu

2. Odbicie ukośne, gdy kąt odbicia nie jest równy kątowi padania (rys. 5.13).



Rys. 5.13. Schematyczne przedstawienie odbicia ukośnego; 1 – ośrodek przed dotarciem fali uderzeniowej, 2 – ośrodek propagacji fali padającej, 3 – ośrodek propagacji fali odbitej; M_x, M_r – liczba Macha określona odpowiednio dla fali padającej i odbitej

3. Odbicie przy wartości krytycznej kąta β , gdy fala uderzeniowa poruszająca się równoległe do podłoża tworzy wraz z falą odbitą trzecią dodatkową falę prostopadłą do przeszkody, tzw. czoło fali Macha (ang. *Mach front*, rys. 5.14).

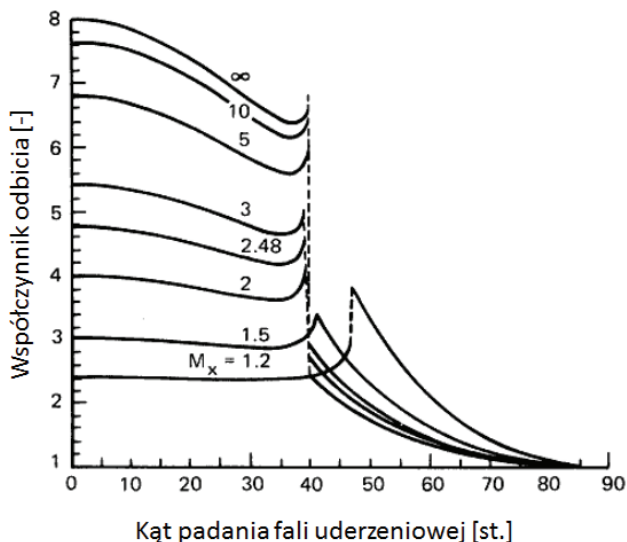


Rys. 5.14. Schematyczne przedstawienie odbicia powietrznego

W praktyce do oszacowania wartości promienia odbitego wykorzystuje się nomogramy zależności tzw. współczynnika padania do kąta β (rys. 5.15). Współczynnik padania Λ definiuje się jako stosunek nadciśnienia odbitego do nadciśnienia padającego i wyraża następującym wzorem:

$$\Lambda = (P_r - P_{\text{atm}})/(P_s - P_{\text{atm}}) \quad (5.3)$$

gdzie P_r jest szczytowym ciśnieniem fali odbitej, a P_s szczytowym ciśnieniem fali padającej.



Rys. 5.15. Zmiany współczynnika odbicia Λ w zależności od kąta padania β

Zależność pomiędzy wartością impulsu fali odbitej a nadciśnieniem impulsu fali określa się jako współczynnik odbicia C_r . Prowadzi to do zależności ciśnienia odbitego od nadciśnienia impulsu (równanie 5.1).

Na rysunku 5.15 pokazano, jak współczynnik odbicia zmienia się w zależności od kąta padania (wartość 0 odpowiada refleksji normalnej, czyli odbiciu prostopadłemu) i początkowej siły wstrząsu wyrażonej liczbą Macha M_x , będącą stosunkiem prędkości fali uderzeniowej do prędkości dźwięku w badanym medium, np. powietrzu. Najogólniejsza postać związku pomiędzy ciśnieniem fali uderzeniowej a liczbą Macha jest następująca:

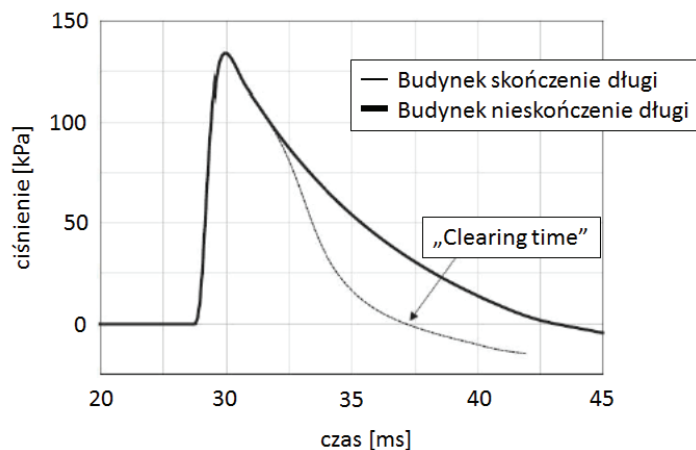
$$P_s/P_a = 1/6(7M_x^2 - 1) \quad (5.4)$$

W przypadku dużych eksplozji maksymalny współczynnik odbicia przyjmuje się około 8, gdy odbicie jest prostopadłe, a do otoczenia przyjmuje się model gazu doskonałego. W rzeczywistości jednak, szczególnie w przypadku dużych

eksplozji, wskutek działania wysokiej temperatury i rozprężenia powietrza współczynnik odbicia może wynieść nawet 20. Dodatkowo, gdy kąt padania jest równy $39,23^\circ$, obserwuje się znaczną nieciągłość interakcji fali padającej i odbitej [Wilkinson i Anderson 2003].

5.3.3. Odbicie fali uderzeniowej od przegrody

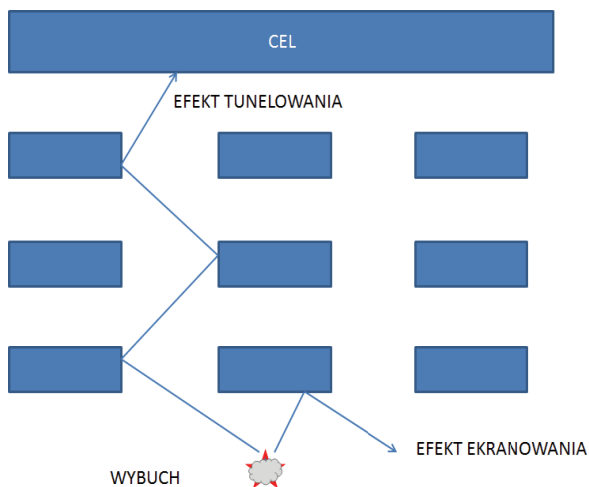
Kiedy fala uderzeniowa dociera do przegrody, odbija się od niej. Ciśnienie po odbiciu może być od 2 do 20 razy wyższe niż ciśnienie fali padającej pod zerowym kątem i do ośmiu razy wyższe w typowych wybuchach [Smith i Rose 2002]. Wzrost ciśnienia zależy głównie od ciśnienia fali padającej, kąta padania, odległości od punktu detonacji i wymiarów przegrody. Ze względu na wymiary przegrody można podzielić na skończone i nieskończone. Różnica przejawia się w tzw. *clearing effect*. Gdy budowla jest skończona (ma niewielkie rozmiary), impuls nadciśnienia jest zwykle dłuższy, niż gdy budowla jest nieskończona (ma większe rozmiary), co zaprezentowano na rys. 5.16.



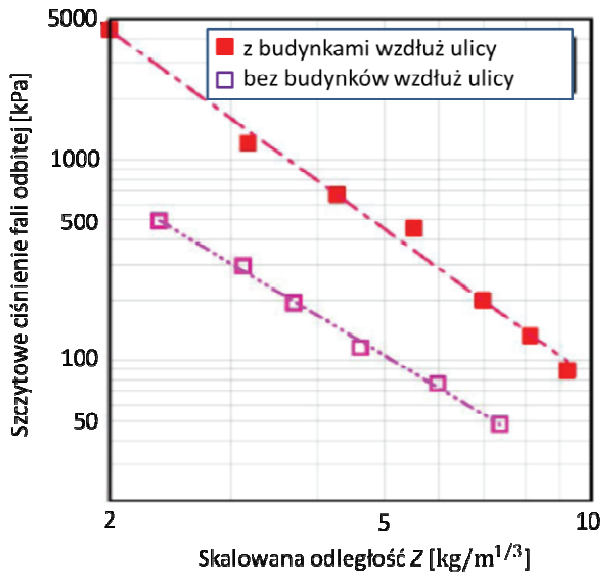
Rys. 5.16. Ciśnienie fali uderzeniowej w przypadku dużych i małych budowli

Gdy wybuch jest bezpośredni i rozkład przegród nie wpływa na falę przechodzącą, wartość i rozkład fali ciśnienia może być obliczony z analitycznych lub półanalitycznych zależności. Gdy układ budynków (przegród) na ulicy jest złożony, występują dwa podstawowe zjawiska: tunelowanie (ang. *channelling*) i ekranowanie (ang. *shielding*). Przedstawiono je na rys. 5.17 [Smith i Rose 2005]. Wpływ ekranowania i tunelowania na ciśnienie jest istotny i zależy od powyższych zjawisk oraz szerokości ulicy, wysokości budynków. W wielu przypadkach pozytywny impuls fali uderzeniowej może być wzmocniony pięciokrotnie (patrz rys. 5.18), a wpływ negatywnego impulsu znacząco rośnie.

W celu dokładnego określenia obciążenia budowli do symulacji takich zjawisk należy wykorzystać metody numeryczne, takie jak CFD i CEL.



Rys. 5.17. Schematyczne przedstawienie tunelowania i ekranowania

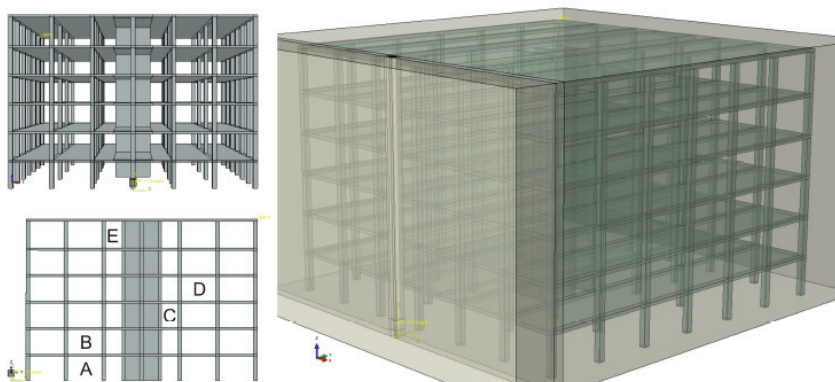


Rys. 5.18. Maksymalne nadciśnienie z uwzględnieniem i bez uwzględnienia budynków na ulicy [Sielicki i Łodygowski 2010; Remennikov i Rose 2005]

5.4. Ewolucja ciśnień w zamkniętym pomieszczeniu

Niżej pokazano możliwość oceny stopnia bezpieczeństwa ludzi przebywających w wielokondygnacyjnym budynku biurowym o konstrukcji słupowo-płytowej, przy którego zewnętrznej elewacji zdetonowano materiał wybuchowy. Budynek składa się sześciu kondygnacji naziemnych przedzielonych płytą – stropem żelbetowym grubości 30 cm. Powierzchnia każdego piętra wynosi około 500 m². Kolejne kondygnacje są podparte 48 słupami o przekroju 30×30 cm² oraz szybem windowym (dwie windy) umieszczonym centralnie wewnątrz budynku. Poglądowy schemat budynku przedstawiono na rys. 5.19.

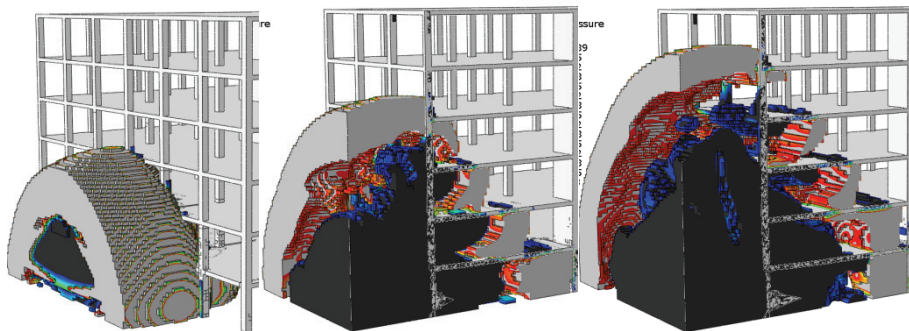
Analizowano dwa warianty zagrożeń opisanej konstrukcji: detonację 100 kg materiału wybuchowego w odległości 1 m od elewacji zewnętrznej oraz 1000 kg w odległości 2 m. W celu uzyskania wiarygodnej propagacji ciśnienia przez poszczególne piętra budynku posłużono się eulerowskimi modelami przepływowymi, a materiał transportujący falę uderzeniową opisano za pomocą równań stanu. Przedstawiona z prawej strony rys. 5.19 prostopadłościenna przestrzeń odzwierciedla powietrze znajdujące w bezpośrednim sąsiedztwie elementów budynku. W analizie nie uwzględniono istnienia elewacji szklanej, ponieważ założono jej całkowite zniszczenie z uwagi na nieprzystosowanie do przenoszenia tego rodzaju nietypowych obciążeń. W rzeczywistości właśnie odłamki (głównie szklane) powodują największe obrażenia przebywających wewnątrz budynku ludzi. Jednak w przedstawionej części zadania strefy bezpieczeństwa oceniano wyłącznie na podstawie analizy skrajnych wartości ciśnień oraz czasu ich występowania w poszczególnych strefach na każdym piętrze budynku.



Rys. 5.19. Schemat konstrukcji wielokondygnacyjnego budynku biurowego [Sielicki 2013]

Wyniki przedstawiono w postaci trójwymiarowych map ciśnienia, które w znacznym stopniu ułatwiły ocenę bezpieczeństwa na poszczególnych kondygnacjach. Wybrane chwile czasowe oraz propagację frontu fali uderzeniowej,

bezpośrednio zagrażającej przebywającym wewnątrz osobom, pokazano rys. 5.20. Ponadto, w punktach A–E wyznaczono uśrednione wartości ciśnienia i impulsu w celu wyznaczenia stopnia zagrożenia dla przebywającego wewnątrz personelu.



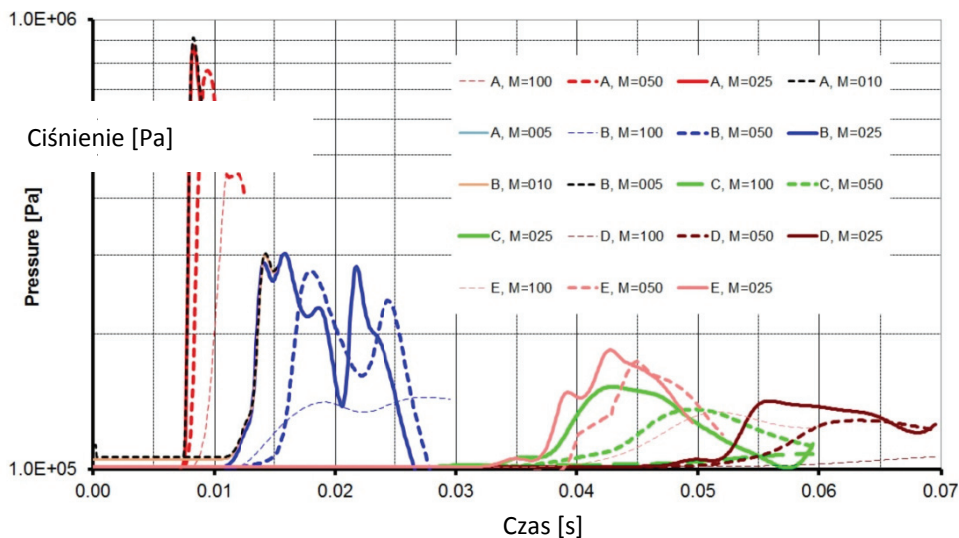
Rys. 5.20. Propagacja ciśnienia w wyniku zewnętrznej eksplozji skondensowanego materiału wybuchowego o masie 1000 kg [Sielicki 2013]

Powyższy przykład obrazuje złożony problem interakcji ośrodka eulerowskiego z deformowaną strukturą opisującą konstrukcję budynku. Pośrednim celem analizy było wyznaczenie stref bezpieczeństwa dla każdego pomieszczenia na wszystkich kondygnacjach. W rozważanym przypadku elewacja zewnętrzna, wykonana z paneli aluminiowo-szklanych, uległa znacznemu zniszczeniu. O ile po wybuchu zewnętrznym najniższa kondygnacja stała się szczególnie niebezpieczna dla przebywających tam ludzi z uwagi na odłamki szkła, o tyle kondygnacje położone wyżej, ulegając zniszczeniu, sprawiły, że nadmiar ciśnienia znalazł się na zewnątrz konstrukcji. Było to bardzo korzystne z punktu widzenia bezpieczeństwa konstrukcji i przebywających w niej osób. Wyniki analizy zależą od sformułowania zadania. Jest to szczególnie istotne, gdy fale ciśnienia przemieszczają się wewnątrz struktury. Porównanie zależności analizowanego punktu w przestrzeni (A–E) wewnątrz budynku oraz sposobu dyskretyzacji przestrzeni w zadaniu ma znaczny wpływ na uzyskane wyniki. Fragmentaryczny wynik przedstawiono na rys. 5.21 [Sielicki 2013].

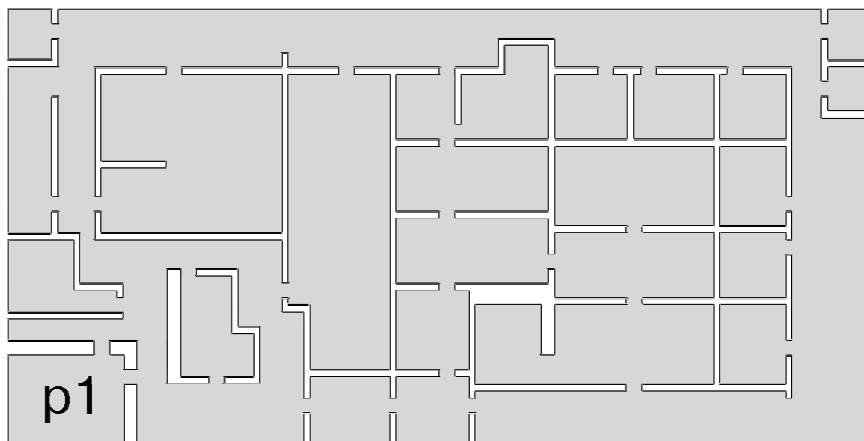
Znacznie bardziej złożona jest analiza eksplozji w budynkach podziemnych lub zaprojektowanych bez okien zewnętrznych. Fala nadciśnienia przemieszcza się po korytarzach budynku aż do momentu samoczynnego wygaśnięcia.

Przedstawiony niżej przykład pokazuje różnice w wyznaczaniu stref bezpieczeństwa personelu na jednej kondygnacji w zależności od uwzględnienia istniejących okien zewnętrznych. Należy zwrócić uwagę, że w budynkach o szczególnym stopniu zagrożenia wybuchem wewnętrznym zaleca się projektowanie mocnych nadproży. Mają one nie tylko zwiększać sztywność całej konstrukcji budynku, ale także zatrzymać lub odbić część poruszającej się fali uderzeniowej. W poniższej analizie nie uwzględniono istnienia drzwi wewnętrznych. Należy

dodać, że specjalnie zaprojektowane przegrody znacznie osłabiają skutki eksplozji, zatrzymując impuls ciśnienia wewnątrz pomieszczenia. W przedstawionej analizie przyjęto wariant, że wszystkie drzwi wewnętrzne są otwarte w momencie wybuchu.



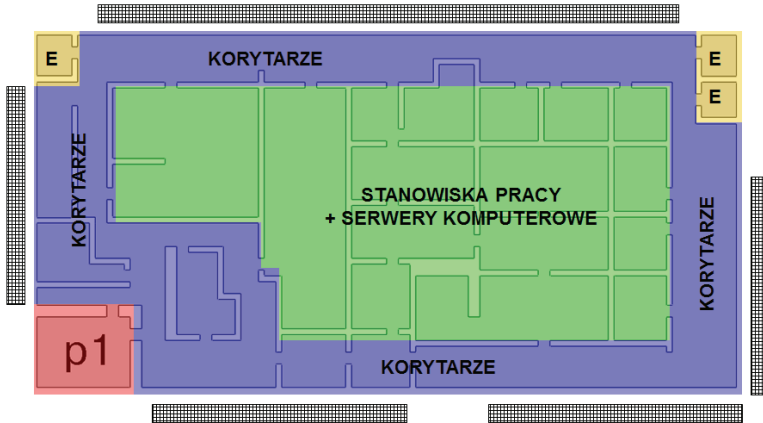
Rys. 5.21. Ewolucja ciśnienia wybuchu w funkcji czasu dla wybranych pomieszczeń i dyskretyzacji przestrzeni [Sielicki 2013]



Rys. 5.22. Rzut kondygnacji; p1 – pomieszczenie, w którym następuje detonacja

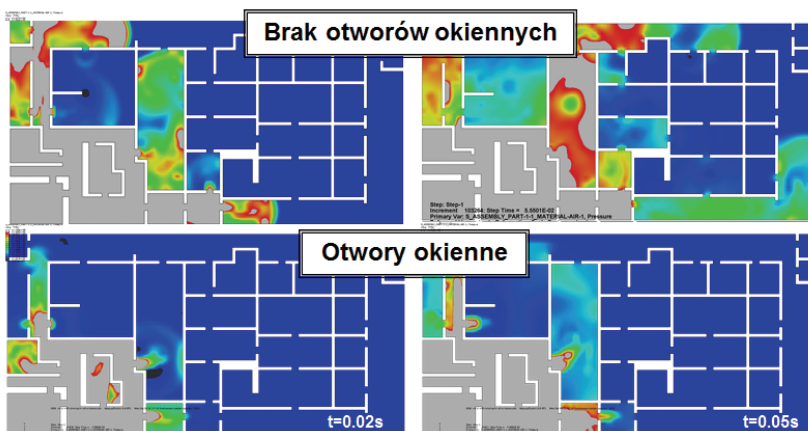
Na rysunku 5.22 pokazano przestrzenny rzut analizowanej kondygnacji. W analizie uwzględniono różnice propagacji ciśnień wynikające z istnienia nadproży drzwiowych. Celem pierwszoplanowym było wyznaczenie wpływu otwo-

rów okiennych na bezpieczeństwo, a w szczególności na zapewnienie swobodnego odpływu nadmiaru ciśnienia z wnętrza budynku. Lokalizację okien przedstawiono na rys. 5.23, na którym dodatkowo wskazano szyby windowe (E) i pomieszczenie, w którym dochodzi do detonacji, oznaczone p1.



Rys. 5.23. Schemat kondygnacji oraz lokalizacja okien zewnętrznych w naziemnej części budynku

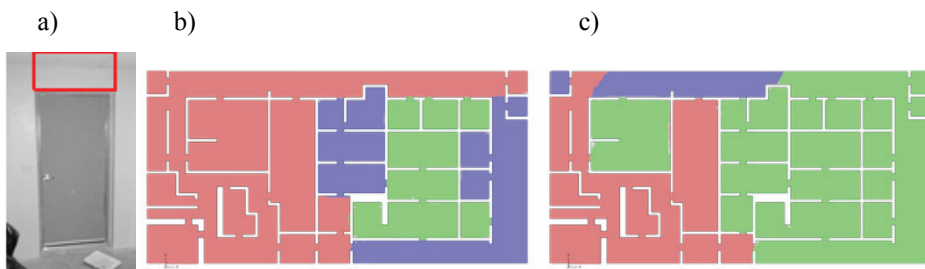
Ewolucję ciśnienia we wnętrzu przedstawiono na rys. 5.24. Pokazano na nim także wpływ otworów w ścianach zewnętrznych na otrzymane wyniki. Zaznaczony w dolnej części rysunku znacznie mniejszy obszar (kolor szary) dowodzi, że energia wybuchu została skierowana gdzie indziej. W tym przypadku przedostała się przez otwory okienne, oczywiście przy założeniu, że konstrukcja okna jest całkowicie podatna.



Rys. 5.24. Ewolucja ciśnienia wewnątrz budynku oraz wpływ na nią otworów okiennych

Za główny efekt uwzględnienia otworów okiennych uznano istotne ograniczenie oddziaływania niebezpiecznej wartości ciśnienia zarówno dla przebywającego wewnątrz personelu, jak i sprzętu komputerowego (wytrzymałość serwerów określono na podstawie wartości przyspieszenia poziomego). Ostatecznie zaproponowano podział budynku na strefy (oddzielnie dla części podziemnej i naziemnej).

Zaprojektowano również specjalne nadproża drzwiowe o podwyższonej wytrzymałości, których zadaniem jest zmniejszenie skutków przejścia fali ciśnienia do kolejnych pomieszczeń. Lokalizację nadproży oraz wpływ ich zwiększonej wytrzymałości na bezpieczeństwo przedstawiono na rys. 5.25. Zielonym kolorem – podobnie jak poprzednio – oznaczono strefy całkowicie bezpieczne dla przebywających w budynku ludzi, natomiast kolorem czerwonym oznaczono strefy niebezpieczne dla personelu. Na rysunku 5.25c przedstawiono uśredniony zakres stref bezpieczeństwa, w których występują nadproża drzwiowe o podwyższonej wytrzymałości. Natomiast rys. 5.25b wskazuje, że gdyby doszło do całkowitego zniszczenia nadproży przez falę ciśnienia, to zakres strefy czerwonej – niebezpiecznej – istotnie by się powiększył.

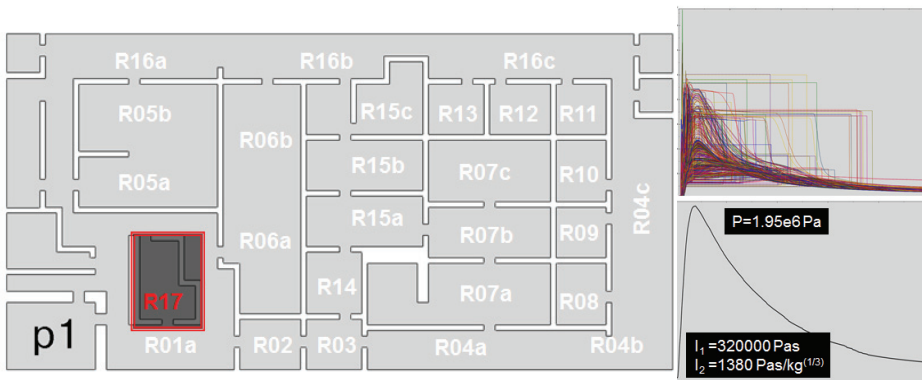


Rys. 5.25. Wpływ uwzględnienia nadproży drzwiowych o podwyższonej wytrzymałości (a) na określenie stref bezpieczeństwa wewnątrz budynku (opis w tekście)

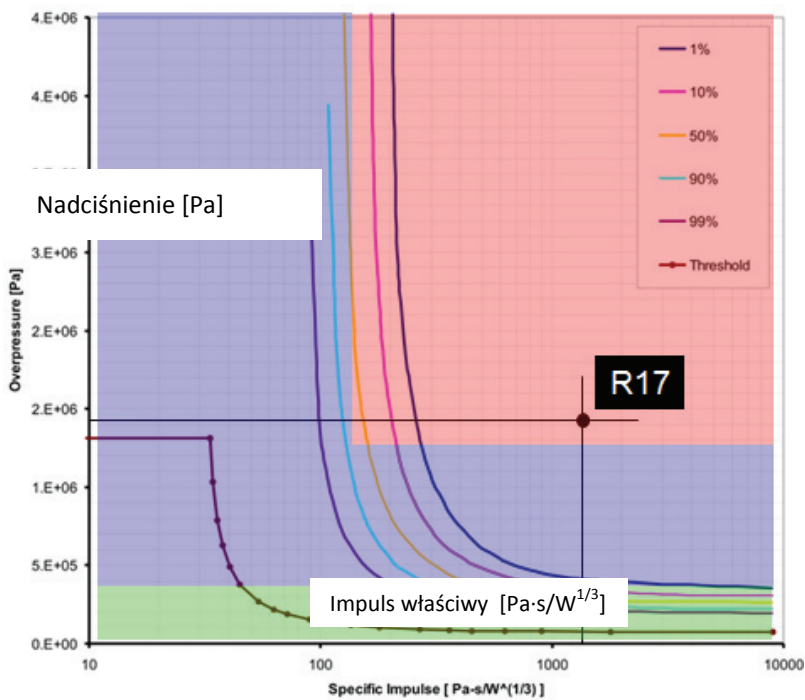
Uśrednienie strefy bezpieczeństwa ograniczono do całych pomieszczeń i oparto na oszacowaniu średniej wartości ciśnienia i impulsu osobno dla każdego pomieszczenia. Wykres zmiany ciśnienia w kilku charakterystycznych punktach pomieszczenia R17 przedstawiono na rys. 5.26. Następnie wyznaczono jeden zastępczy wykres ciśnienia, na podstawie którego dokonano klasyfikacji pomieszczenia.

W celu ostatecznej weryfikacji analizy na podstawie kryterium uszkodzenia klatki piersiowej [Unified Facilities Criteria, 2008] opracowano rys. 5.27, przedstawiający zasięg stref bezpieczeństwa, wyznaczonych z uwzględnieniem istniejących drzwi i wysokiej wytrzymałości nadproży. Dodatkowo na tym rysunku pokazano, jak na podstawie wartości uśrednionej ciśnienia i impulsu pomieszczenie R17 zaklasyfikowano do strefy czerwonej.

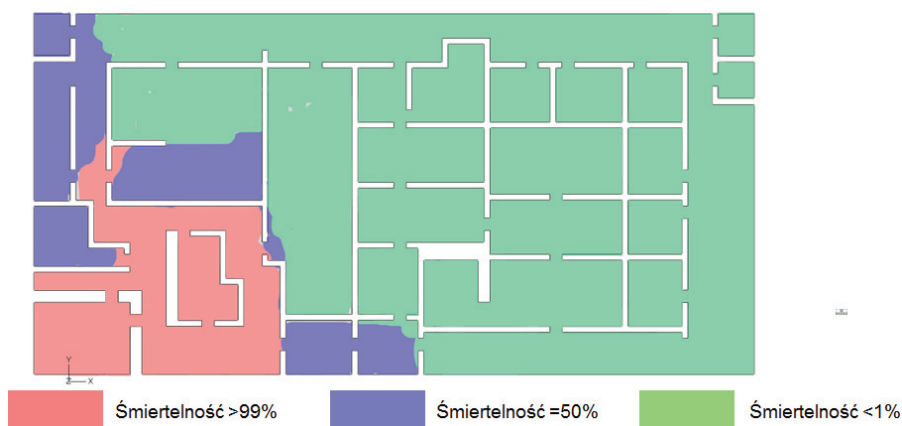
Końcowy wynik analiz przedstawiono na rys. 5.28.



Rys. 5.26. Wyznaczenie zastępczego, uśrednionego ciśnienia w celu określenia strefy bezpieczeństwa



Rys. 5.27. Kryterium uszkodzenia klatki piersiowej [Sielicki 2013]



Rys. 5.28. Określenie stopnia zagrożenia życia personelu

5.5. Propozycja uproszczonego, empirycznego wyznaczania rozkładu ciśnienia

5.5.1. Metody oceny właściwości fali uderzeniowej

Jest kilka metod oceny właściwości fali uderzeniowej wywołanej detonacją ładunku wybuchowego. Można je podzielić na:

- empiryczne,
- półempiryczne,
- numeryczne.

Metody empiryczne są oparte na koncepcji skalowania odległości. Metodą najbardziej użyteczną wydaje się skalowanie odległości Z Hopkinsona-Cranza [Baker i in. 1983]:

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \quad (5.5)$$

gdzie: R – odległość ładunku [m],

W – masa odpowiadająca wielkości ładunku TNT [kg].

W metodach półempirycznych ocena wybuchu jest oparta na skalowaniu odległości w połączeniu z podejściem analitycznym, aby uwzględnić nakładanie się fali uderzeniowych. Podczas eksplozji wewnątrz budynków ciśnienie wybuchu może się kumulować na skutek odbić od ścian i innych powierzchni. Taka analiza pozwala na określenie przebiegu ciśnienia w danym miejscu.

W przypadku bardzo skomplikowanej geometrii (np. środowisko miejskie lub budynek ze złożoną geometrią wewnętrzną) może być konieczne użycie w pełni analitycznego modelu. Służą do tego metody numeryczne oparte na

sformułowaniu Eulera, w tym SHAMRC, ANSYS AUTODYN i Air3d. W tych modelach powietrze jest traktowane jak gaz idealny, a sam wybuch jest modelowany z użyciem odpowiednich równań stanu materiału wybuchowego.

5.5.2. Parametry obciążenia wybuchem – metoda empiryczna

Parametry wybuchu są głównie zależne od ilości energii powstałej w wyniku detonacji materiału wybuchowego oraz od odległości od eksplozji. Uniwersalny opis skutków wybuchu jest oparty na parametrze zależnym od wartości uwolnionej energii oraz od ciśnienia otoczenia:

$$\left(\frac{E}{P_o}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (5.6)$$

gdzie: E – uwolniona energia reakcji [kJ],

P_o – ciśnienie otoczenia, najczęściej przyjmowane jako 100 kN/m².

Skalowanie pierwiastkowe parametrów wybuchu. Większość z opublikowanych wzorów i monogramów dotyczących właściwości fali uderzeniowych spowodowanych wybuchem jest przedstawiana jako funkcja przeskalowanej odległości Z . Podejście to jest zasadne przede wszystkim dlatego, że umożliwia przedstawienie danych uzyskanych dla różnych materiałów na jednym wykresie lub w jednej tabeli.

W teorii wybuchów stosuje się skalowanie pierwiastkowe, ponieważ ma ono podstawy w teorii Hopkinsona. Według niego parametry fal uderzeniowych, takich jak nadciśnienie, powinny być przeskalowane z użyciem pierwiastka sześciennego masy ładunku wybuchowego W .

Poniżej przedstawiono kilka podstawowych zredukowanych parametrów, do których wyznaczenia wykorzystano skalowanie za pomocą pierwiastka sześciennego (równanie 5.5):

- dodatni impuls fali podmuchowej spowodowanej powietrznym wybuchem trotylu według wzoru Sadowskiego:

$$I^+ [\text{kP} \cdot \text{s}/\text{m}^2] = \begin{cases} (34 \div 36)W^{2/3}R^{-1} & \text{dla } Z > 0,5 \\ 15WR^{-2} & \text{dla } Z < 0,25 \end{cases} \quad (5.7)$$

- maksymalna wartość nadciśnienia [Sielicki 2013]:

$$\Delta p^+ [\text{Pa}] = \max P(t) - P_{\text{atm}} = \begin{cases} 0,9Z^{-2} & \text{dla } 1,4 < Z < 6,4 \\ 0,45Z^{-1,5} & \text{dla } Z > 6,5 \end{cases} \quad (5.8)$$

- całkowity czas propagacji fali uderzeniowej:

$$t = t_a + t^+ + t^-$$

$$t_a [\text{s}] = 0,34R^{1,4}W^{-0,2}/340$$

$$t^+ [\text{ms}] = (0,107 + 0,444Z + 0,264Z^2 - 0,129Z^3 + 0,0335Z^4)W^{1/3}$$

$$t^- [\text{ms}] = 1,25W^{1/3} [1,25/lb^{1/3}]$$

Skalowanie za pomocą pierwiastka sześciennego jest najprostszym i najogólniejszym sposobem skalowania. Jego stosowanie jest ograniczone do względnie niedużych wybuchów podobnego rodzaju i o podobnym przebiegu. Do porównania różnych wybuchów (również dużej mocy) właściwsze jest skalowanie Sachsa, gdyż pozwala ono uwzględniać zróżnicowane warunki otoczenia. Zgodnie z prawem Sachsa, bezwymiarowe nadciśnienie i impuls fali uderzeniowej są funkcjami bezwymiarowej odległości. Bezwymiarowe zmienne Sachsa są następujące:

$$\lambda = RR_0^{-1} = R(E/P_{\text{atm}})^{-1/3}, \quad P = \Delta p^+ P_{\text{atm}}^{-1}, \quad I = I^+ c_0 / \Delta p^+ \quad (5.9)$$

gdzie: R_0 – promień wybuchu,
 E – energia wybuchu,
 c_0 – prędkość dźwięku w niezaburzonym ośrodku.

Ciśnienie wybuchu. W latach 1950-1960 wielu naukowców próbowało oszacować ciśnienie, jakie wywiera dana masa materiału wybuchowego na powierzchnię znajdującą się w określonej odległości. Na podstawie licznych doświadczeń i obserwacji wyznaczono empiryczne zależności między wartością nadciśnienia impulsu a parametrami Z , R , W dla różnych rodzajów wybuchów.

Zaproponowane w 1955 roku przez Brode'a [Brode 1955] równanie dla sferycznego wybuchu ma postać:

$$P_{so} = \frac{6,7}{Z^3} + 1 \quad \text{dla } P_{so} > 10 \text{ bar} \quad (5.10)$$

oraz

$$P_{so} = \frac{0,975}{Z} + \frac{1,455}{Z^2} + \frac{5,85}{Z^3} - 0,019 \quad \text{dla } 0,1 \text{ bar} < p_s < 10 \text{ bar} \quad (5.11)$$

Newmark i Hansen [1961] zaproponowali wzór pozwalający określić maksymalne nadciśnienie eksplozji materiału wybuchowego umieszczonego na ziemi:

$$P_s = 6784 \frac{W}{R^3} + 93 \left(\frac{W}{R^3} \right)^{0.5} \quad [\text{bar}] \quad (5.12)$$

Kolejne wyrażenie pozwalające opisać nadciśnienie impulsu podał w 1987 roku Mills [1987]:

$$P_s = \frac{1772}{Z^3} - \frac{114}{Z^2} + \frac{108}{Z} \quad [\text{kPa}] \quad (5.13)$$

Jak wspomniano wcześniej, gdy rozchodząca się fala uderzeniowa napotka na swojej drodze przeszkodę, która nie będzie równoległa do kierunku propagacji fali, to powstanie fala odbita zwiększająca wartość nadciśnienia do wartości maksymalnego ciśnienia odbitego, określonej wzorem:

$$p_r = 2p_s + \left(\frac{C_p}{C_v} + 1 \right) q_s \quad (5.14)$$

gdzie: p_r – impuls nadciśnienia odbitego,
 C_p – ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu,
 C_v – ciepło właściwe przy stałej objętości.
 Ciśnienie dynamiczne

$$q_s = \frac{1}{2} \rho_s u_s^2 \quad (5.15)$$

$$u_s = \frac{a_o p_s}{\frac{C_p}{C_v} p_o} \left(1 + \frac{\frac{C_p}{C_v} + 1}{2} \frac{p_s}{p_o} \right) \quad (5.16)$$

gdzie: u_s – prędkość rozchodzenia się fali uderzeniowej,
 a_s – prędkość dźwięku.

Równanie (5.14) można także zapisać w postaci:

$$p_r = 2p_s \left(\frac{7p_o + 4p_s}{7p_o + p_s} \right) \quad (5.17)$$

gdzie: p_s – statyczne nadciśnienie impulsu fali,
 p_o – ciśnienie otoczenia.

Na podstawie tego wzoru można określić zarówno maksymalną, jak i minimalną wartość ciśnienia odbitego. Wartość minimalna występuje wtedy, gdy nadciśnienie impulsu fali jest dużo mniejsze niż ciśnienie otoczenia. Wartość maksymalna z kolei występuje wtedy, gdy nadciśnienie impulsu fali jest znacznie większe niż ciśnienie otoczenia. W tych dwóch przypadkach równanie (5.17) można uprościć do postaci: $p_r = 2p_s$ dla wartości minimalnej oraz $p_r = 8p_s$ dla wartości maksymalnej.

Równoważnik trotylu. Charakterystyka wybuchu zależy od różnych czynników, np. rodzaju użytych materiałów wybuchowych (MW), rodzaju inicjacji i jej rozległości, stopnia rozproszenia w otoczeniu (wybuch pojedynczy, wielokrotny), stopnia koncentracji materiału wybuchowego (np. proszek, sprasowanie), stopnia jednolitości (w przypadku mieszanin), grubości, temperatury, zawartości spowalniaczy, wartości bilansu *OB* oraz opakowania ładunku. Mnogość szcze-

gólów wpływających na właściwości wybuchu powoduje, że nawet detonacja jednakowej ilości tego samego materiału może mieć różną moc.

Do porównania różnych eksplozji służy tzw. równoważnik trotylu. Parametr ten jest masowym wskaźnikiem mocy wybuchu, wyrażającym ilość trotylu wymaganej do uzyskania energii ekwiwalentnej do rzeczywiście zdetonowanego ładunku wybuchowego. Równoważnik trotylu wyraża się następującym wzorem:

$$\alpha_{\text{TNT}} = \frac{\eta Q}{\eta_{\text{TNT}} Q_{\text{TNT}}} \quad (5.18)$$

gdzie η jest współczynnikiem wykorzystania energii wybuchu, zależnym od użytego materiału wybuchowego. Zazwyczaj przyjmuje on wartości z zakresu od 0,4 dla wybuchów gazowych do 0,8 dla wysokoenergetycznych MW. Wartości Q i Q_{TNT} odpowiadają wartości ciepła wybuchu, określonej dla użytego materiału i trotylu. Z uwagi na ilość i podatność czynników wpływających na ostateczną moc wybuchu (m.in. na dokładność wykonania ładunku) należy brać pod uwagę ograniczenia praktyczne otrzymywanych wartości.

Obligatoryjne wartości równoważnika trotylu można uzyskać jedynie z indywidualnie przygotowanych doświadczeń, porównując wartości ciśnienia $\max P^+$ lub impulsu I^+ otrzymane podczas detonacji danego materiału wybuchowego i TNT.

5.5.3. Parametry obciążenia wybuchem – metoda numeryczna

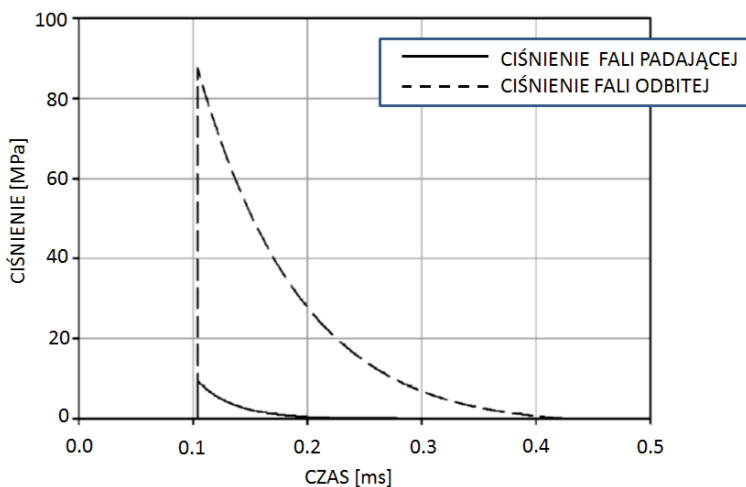
Oprócz metod służących do aproksymacji maksymalnej wartości ciśnienia szczytowego powstającego w wyniku różnego rodzaju eksplozji (wybuch w przestrzeni lub wybuch powierzchniowy) opracowano również inne metody wyznaczania kształtu krzywej nadciśnienia. Jedną z tych metod określa się liniowy rozkład ciśnienia w czasie. Druga (chyba najpopularniejsza) pozwala wyznaczyć rozkład ciśnienia w czasie w postaci funkcji wykładniczej. Opracowano też wiele wykresów i tabel służących do prognozowania ciśnienia uderzeniowego i czasu trwania wybuchu.

Obecnie do symulacji wybuchu można wykorzystać program ConWep [Hyde 1991], opracowany przez U.S. Army. Służy on do prognozowania wartości ciśnienia obciążającego konstrukcję. Jest oparty na dużej bazie danych doświadczalnych, ewidencji wybuchów, parametrów wybuchu dla różnych mas ładunków wybuchowych i odległości od konstrukcji. Główną jego zaletą jest to, że obciążenie jest przykładane bezpośrednio do obiektu w formie ciśnienia zmiennego w czasie. Nie ma potrzeby modelować medium, w którym rozchodzi się fala uderzeniowa. W programie ConWep dostępne są dwa empiryczne modele fal: sferyczne fale dla eksplozji w powietrzu i fale półkuliste dla wybuchów na poziomie gruntu. W drugim modelu uwzględniono również skutki odbicia

[ABAQUS 2010]. Innym dostępnym na rynku programem jest AtBlast, sfinansowany przez U.S. General Services Administration (www.ara.com/products/AT-blast.htm). Za pomocą obu aplikacji można odtworzyć historię zmian ciśnienia wywołanych wybuchem w powietrzu lub wybuchem powierzchniowym, średnie ciśnienie szczytowe oraz impuls z powierzchni półkuli fali uderzeniowej.

ConWep. Korzystanie z metod numerycznych w analizie wybuchów i modelowaniu obciążenia wybuchem można podzielić na dwa etapy: pierwszy to modelowanie fali uderzeniowej, a drugi modelowanie konstrukcji budynku poddanego takiemu obciążeniu. Program ConWep pozwala określić skutki wybuchów i dotyczy to zarówno wystrzału pocisku, jak i fali uderzeniowej. Podczas modelowania wybuchu użytkownik wprowadza dane dotyczące masy ładunku oraz współrzędne punktu przyłożenia ładunku, na podstawie których jest wyznaczana odległość od obiektu. Podaje się także rodzaju wybuchu – powietrzny albo powierzchniowy. Wartością uzyskiwaną z programu jest ciśnienie w danym punkcie przestrzeni, występujące w określonym czasie.

Przykładowy wykres zależności od czasu wartości ciśnienia pierwotnego i odbitego, wywołanego półsferycznym wybuchem powierzchniowym ładunku TNT o masie 3 kg w odległości 46 cm od obiektu, przedstawiono na rys. 5.29. Ciśnienie takie oddziałuje na konstrukcję jako fala płaska. Fala ta stanowi równomierne obciążenie, różne w każdej chwili.



Rys. 5.29. Wykres ciśnienia w czasie uzyskany za pomocą programu ConWep

Przedstawione w podrozdziale rozważania analityczne zainteresowały dwóch amerykańskich naukowców – Kingery’ego i Bulmasha, pracujących dla armii Stanów Zjednoczonych Ameryki. Przedstawili oni równania pozwalające określić parametry sferycznego wybuchu powietrznego oraz półsferycznego

wybuchu powierzchniowego. Zależności te zamieszczono w publikacji Departamentu Armii USA – TM-5-855-1 – *Projektowanie i analiza wzmacnianych konstrukcji poddanych działaniu broni konwencjonalnych*. Wzory, za pomocą których można określić parametry fali uderzeniowej, opracowano przez dopasowanie krzywych wielomianu wyższego rzędu do danych doświadczalnych uzyskanych z badań prowadzonych z użyciem materiałów wybuchowych o masie $1 \text{ kg} > m \leq 400 \text{ tys. kg}$.

Wszystkie obliczenia w programie ConWep dotyczą tylko jednego materiału wybuchowego – trotylu. Dla innych rodzajów materiałów należy przyjmować równoważnik masy TNT. Równania wykorzystane w programie zawierają wykładniczą funkcję wartości ciśnienia wybuchu w czasie, pozwalającą uzyskać dokładniejsze rezultaty niż funkcja liniowa, jeśli rzeczywiste ciśnienie zanika w sposób wykładniczy. Zależność ciśnienia od czasu opisuje wzór:

$$P(t) = P_{so} \left[1 - \frac{t - T_A}{T_o} \right] \cdot e^{-A \frac{(t - T_A)}{T_o}} \quad (5.19)$$

w którym: $P(t)$ – wartość ciśnienia w chwili t [kPa],

P_{so} – nadciśnienie impulsu fali [kPa],

T_o – czas trwania fazy pozytywnej [ms],

A – współczynnik zanikania [–],

T_a – czas dotarcia fali uderzeniowej [ms].

Powyższe równanie często jest nazywane równaniem Friedlandera [Smith i Hetherington 1994]. Parametry fali uderzeniowej, wartość ciśnienia pierwotnego, odbitego, nadciśnienie impulsu fali, czas trwania fazy pozytywnej, czas dotarcia fali uderzeniowej oblicza się za pomocą odpowiednich równań. Na podstawie wartości P_{so} oraz czasu trwania fazy pozytywnej program iteracyjnie oblicza wartość współczynnika zanikania A . Następnie za pomocą równania Friedlandera oblicza się wartość ciśnienia w różnych okresach. W analizie tej nie jest brana pod uwagę faza pozytywna, co jest dobrym założeniem, gdy wybuch następuje w małej odległości od obiektu.

Taka sama metoda określania parametrów ciśnienia została przyjęta w analizie fali odbitej. Warto zauważyć, że istnieje rozbieżność między wynikami uzyskanymi w programie ConWep a danymi eksperymentalnymi, gdy wartości parametru Z są małe, tzn. $Z \leq 0,5$. Dlatego zaleca się stosowanie programu ConWep do wartości Z z przedziału:

$$0,2 \leq \frac{P_{\text{impulsu}}}{P_{\text{otoczenia}}} \leq 20 \quad (5.20)$$

lub

$$0,7 \frac{\text{m}}{\text{kg}^{1/3}} \leq Z \leq 6,6 \frac{\text{m}}{\text{kg}^{1/3}} \quad (5.21)$$

Można więc stwierdzić, że ConWep, jak każdy program wspomagający projektowanie, nie daje w 100% dokładnych wyników, jednak w porównaniu z doświadczeniami rezultaty są poprawne i zadowalające.

Inne metody numeryczne. Analiza oparta na historii zmian ciśnienia w czasie, prowadzona z użyciem ConWep lub AtBlast, daje dobre wyniki. Jednak w metodach tych nie są uwzględnione: geometria konstrukcji, odbicie wielu fal oraz efekt *shadowing*, występujący, gdy obiekt jest zasłonięty przez inne konstrukcje. Czynniki te mogą znacząco zmienić wartość powstającego ciśnienia. Jeśli więc potrzebne są dokładniejsze wyniki, należy korzystać z innych metod. Jedną z możliwości jest użycie programu opartego na metodzie elementów skończonych, czyli Autodyn, Dyna3D, LS-Dyna, Abaqus. Za pomocą tych programów można prowadzić analizę sprzężoną, w której model wybuchu jest powiązany z modelem konstrukcji. W tego typu analizach są rozwiązywane dwa zagadnienia jednocześnie: (1) CFD (dynamika płynów) w celu określenia rozkładu obciążenia wybuchem oraz (2) CSM (mechanika ciała stałego) do modelowania strukturalnego badanej konstrukcji. Dzięki uwzględnieniu ruchu konstrukcji wywołanego podmuchem można przewidzieć dokładniej ciśnienie, które powstaje w wyniku przemieszczeń konstrukcji. Analogiczne symulacje mogą być prowadzone w Abaqus z wykorzystaniem metody *Coupled-Eulerian-Lagrange* (CEL).

5.6. Ocena bezpieczeństwa personelu i konstrukcji w różnych strefach budynku

5.6.1. Zniszczenie budynku

Zakres oraz nasilenie uszkodzeń konstrukcji i niebezpieczeństwa utraty zdrowia w wyniku działania materiałów wybuchowych stanowi obecnie obszar intensywnych badań naukowych. Najlepszymi obiektami badawczymi są kontrolowane wybuchy podczas rozbiórki rzeczywistych obiektów. Bada się również wszelkiego rodzaju katastrofy i ataki terrorystyczne. Rzeczywiste wydarzenia pokazują złożoność i gwałtowność eksplozji oraz to, że właściwie każde zdarzenie jest unikatowe. W literaturze można znaleźć kilka uniwersalnych sformułowań dotyczących spodziewanego ogólnego poziomu uszkodzenia w zależności od oszacowanej ilości i rodzaju zdetonowanych materiałów wybuchowych, pomimo liczących wątpliwości co do ich poprawności.

Uszkodzenia spowodowane przez powietrzną falę uderzeniową można podzielić na dwie kategorie – bezpośrednie działanie wybuchu oraz jej oddziaływanie na postępujące w czasie zniszczenie, np. wyboczenie części konstrukcji wsku-

tek rosnącej temperatury. Skutki bezpośrednie są spowodowane oddziaływaniem bardzo dużego ciśnienia na stosunkowo małą powierzchnię. Najbardziej narażone są elementy konstrukcji znajdujące się w najmniejszej odległości od źródła wybuchu. Są nimi zewnętrzne ściany, słupy i odsłonięte belki nadproży. Uszkodzenia tych elementów są najczęstszą przyczyną zawalenia całych konstrukcji.

Fala uderzeniowa po zderzeniu ze strukturą powoduje powstanie na jej powierzchni impulsu wysokiego ciśnienia, nierzadko wielokrotnie większego od sił, na które budynek został zaprojektowany. Po zniszczeniu części fasad i okien fala uderzeniowa wnika do konstrukcji i uszkadza jej wewnętrzne elementy konstrukcyjne. Szczególnie niebezpieczne jest oddziaływanie na żelbetowe przegrody poziome. Stropy, zbrojone zazwyczaj od dołu, są unoszone pod wpływem parcia fali uderzeniowej, w wyniku czego ulegają gwałtownemu kruchemu zniszczeniu. Fala uderzeniowa powstała po eksplozji o dużej mocy w przeciagu kilku milisekund może objąć swym działaniem cały budynek i spowodować wybicie okien po przeciwległej stronie.

Szkló jest najczęściej najsłabszym elementem budynku, pękającym przy wielokrotnie niższym ciśnieniu niż inne części budynku, np. ściany. Obserwacje i analiza skutków rzeczywistych wybuchów wykazała, że zniszczenie szklanych fasad może wystąpić na obszarze kilku kilometrów od źródła wybuchu. Z uwagi na kruchą postać zniszczenia szkła i duże prędkości osiągnane przez powstające odłamki są one jednymi z największych zagrożeń ludzi.

5.6.2. Bezpieczeństwo ludzi

Nasilenie i rodzaj obrażeń poniesionych wskutek wybuchu zależą od uszkodzenia konstrukcji. Wysokie ciśnienie fali uderzeniowej, która przechodzi przez powybijane szyby, może spowodować uszkodzenia błony bębenkowej (barotraumę) i zapadnięcie płuc (odmę płucną).

W wyniku uszkodzenia zewnętrznych fasad budynku powstaje duża ilość odłamków, które tak jak pociski zadają rany. Szczególnie niebezpieczne są małe kawałki szkła, powodujące rany kłute i cięte. Większe fragmenty elewacji i wyposażenia budynku mogą powodować znaczne obrażenia obuchowe i sieczne z przygnieceniem, kończącym się amputacją kończyn. Wreszcie fala uderzeniowa może przewrócić człowieka lub unieść w powietrze na znaczną odległość.

Podsumowując, można stwierdzić, że największym zagrożeniem dla ludzi są obrażenia spowodowane przez przemieszczające się z dużą prędkością odłamki zniszczonych fragmentów konstrukcji, szczególnie szkła. W skrajnych przypadkach ludzie giną w wyniku całkowitego zawalenia części lub całych konstrukcji. Dla przykładu, w zamachu bombowym Murrah Federal Building w Oklahoma City obrażenia od szkła miało około 40% osób ocalałych wewnątrz budynku oraz około 30% przebywających w jego pobliżu. Zdetonowany ładunek wybuchowy ważył około 2300 kg (paliwo: nitrometan, azotan amonu), zginęło 168 osób.



Rys. 5.30. Katastrofa w Murrah Federal Building

5.6.3. Poziom zabezpieczeń

Ilość materiałów wybuchowych i ich spodziewane skutki, określane przez analogię do rzeczywistych zdetonowanych ładunków i zniszczeń obiektów, determinują wymagany poziom ochrony. Wiele organizacji rządowych przede wszystkim z USA, opracowało własne klasyfikacje poziomu ochrony w celu odpowiedniego zabezpieczenia konstrukcji budynków przed zawaleniem i zmniejszenia liczby rannych i zabitych. W tabeli 5.1 przedstawiono klasyfikację poziomu zabezpieczenia, opracowaną przez Department of Defense United States of America.

Tab. 5.1. Pięć poziomów zabezpieczeń według Department of Defense United States of America (UFC 4-010-01) [2003]

Poziom ochrony	Przewidywane uszkodzenia konstrukcji	Przewidywane uszkodzenia drzwi i okien	Przewidywane ofiary w ludziach
1	2	3	4
Poza standardem	ciężkie uszkodzenia lub całkowite zniszczenie; konstrukcje ramowe zawalone; ocalałe nieliczne elementy	drzwi i okna całkowicie zniszczone, stanowią śmiertelne zagrożenie dla ludzi	większość to ofiary śmiertelne
Bardzo niski	duże uszkodzenia i deformacje głównej konstrukcji (stan awaryjny); małe ryzyko całkowitego zawalenia; elementy drugorzędne całkowicie zniszczone	oszklenie wybite i wepchnięte do środka; fragmenty szkła mogą powodować obrażenia; drzwi wepchnięte do pokoi, stanowią poważne zagrożenie dla ludzi	większość personelu dozna poważnych obrażeń; ofiary śmiertelne około 10–25%

Tab. 5.1 cd.

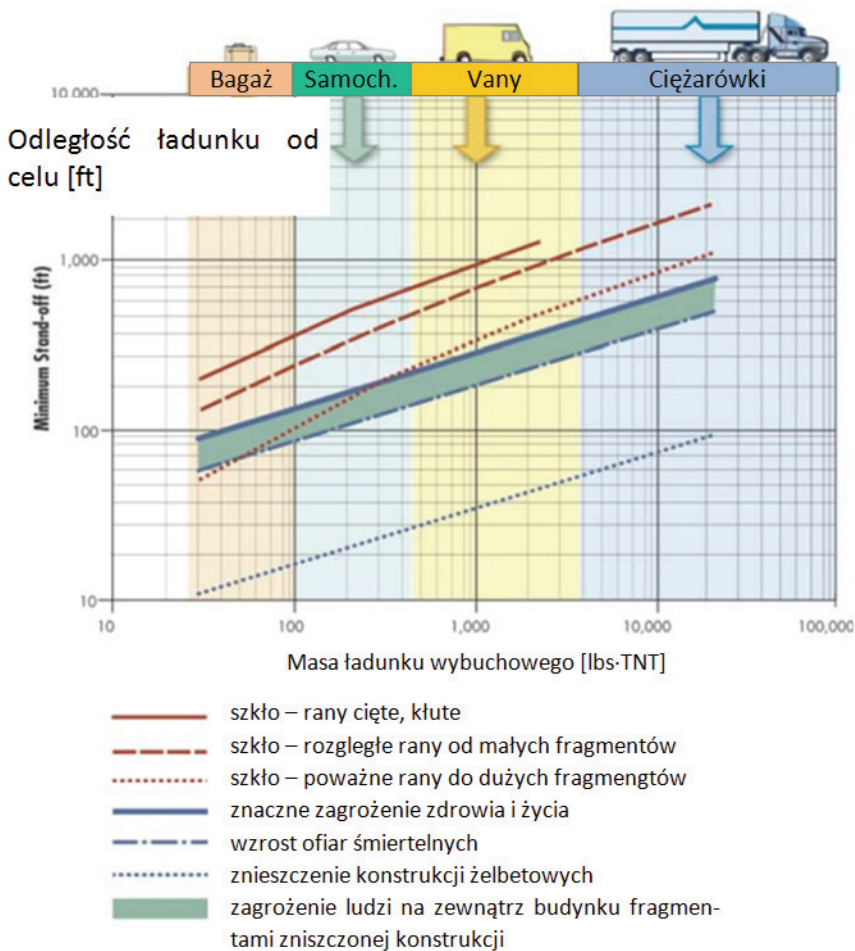
1	2	3	4
Niski	nieodwracalne uszkodzenia konstrukcji; małe deformacje głównych elementów nośnych i duże elementów drugorzędnych; całkowite zawalenie mało prawdopodobne	szyby wybite i wepchnięte do środka na głębokość około 1,0 m, stanowią ograniczone zagrożenie dla zdrowia; drzwi zniszczone, ale bez znacznych przemieszczeń, powodują małe zagrożenie	większość personelu dozna poważnych obrażeń; ofiary śmiertelne poniżej 10%
Średni	uszkodzenia w większości odnawialne; małe deformacje elementów drugorzędnych; główna konstrukcja nośna bez trwałych odkształceń	szyby pęknięte, ale pozostają we framugach; drzwi pozostają w ościeżnicach, ale są poważnie uszkodzone	kilka drobnych obrażeń; ofiary śmiertelne mało prawdopodobne
Wysoki	uszkodzenia są powierzchniowe; brak trwałych odkształceń	szyby nie są zbite; drzwi nadają się do ponownego użytku	prawdopodobne są tylko powierzchowne obrażenia

Powyższe poziomy ochrony mogą być w przybliżeniu odniesione do dowolnej konstrukcji w zależności od maksymalnej wartości ciśnienia fali uderzeniowej, zgodnie z tabelą 5.2.

Tab. 5.2. Poziom ochrony w zależności od maksymalnej wartości nadciśnienia według Department of Defense United States of America (UFC 4-010-01) [2003]

Parametr	Poziom ochrony			
	wysoki	średni	niski	bardzo niski
Maksymalna wartość nadciśnienia [psi]	1,1	1,8	2,3	3,5

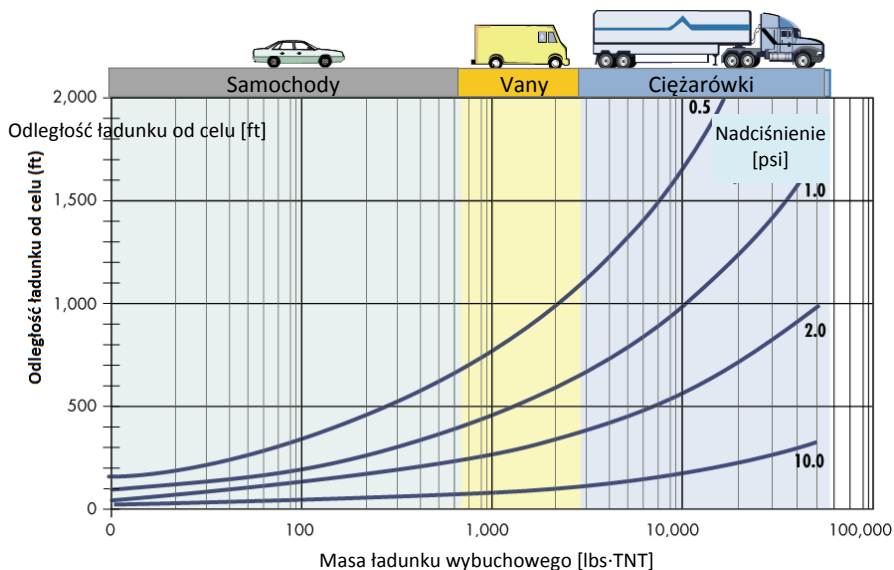
Skutki wybuchu w zależności od odległości ładunku do celu i jego wielkości przedstawiono na rys. 5.31 [FEMA 2003]. Monogram ten może być wykorzystany do oszacowania skutków wybuchu i podstawowej oceny zagrożenia dla ludzi. Dodatkowo może posłużyć do wyznaczenia stref podwyższonego zagrożenia w zależności od granicznych odległości jako funkcji równoważnika trotylu i wielkości ładunku wybuchowego oraz ustalonego poziom bezpieczeństwa.



Rys. 5.31. Zakres zagrożeń wybuchem w zależności od masy i odległości ładunku wybuchowego; ft = 0,305 m, lbs = 0,45 kg [FEMA 2003]

Na potrzeby projektowania przyjmuje się, że duże ciężarówki-bomby zawierają zazwyczaj ponad 4500 kg materiałów wybuchowych, wyrażonych w TNT, samochody osobowe od 230 do 1800 kg, torba około 23 kg, a tzw. bomby rurowe 3 kg trotylu.

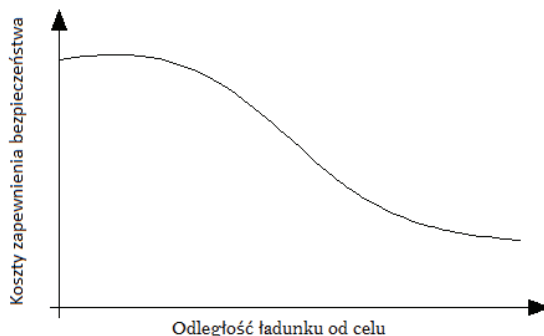
Innym typem monogramów służących do oszacowania skutków wybuchu są wykresy pokazujące ich zależność od masy typowych ładunków i ich odległości od celu oraz krzywe maksymalnego ciśnienia powstającego na powierzchni obiektu. Przykład takiego wykresu przedstawiono na rys. 5.32.



Rys. 5.32. Wartości ciśnienia fali uderzeniowej w zależności od wielkości i odległości od celu ładunku wybuchowego; ft = 0,305 m, lbs = 0,45kg; psi = 6895 Pa [FEMA 2003]

5.6.4. Strefa rażenia

Energia wybuchu gwałtownie maleje wraz ze wzrostem odległości ładunku od celu. Ogólne koszty zapewnienia wymaganej ochrony w zależności od odległości pokazano na rys. 5.33.



Rys. 5.33. Szacunkowe zmiany kosztów bezpieczeństwa w zależności od odległości MW od budynku

Zwiększenie minimalnej odległości ładunku od obiektu wymaga umieszczenia tego obiektu na większej działce. Wiąże się to z kosztami oraz utrudnia wybór lokalizacji, szczególnie na terenach aglomeracji miejskich. Dodatkowo ob-

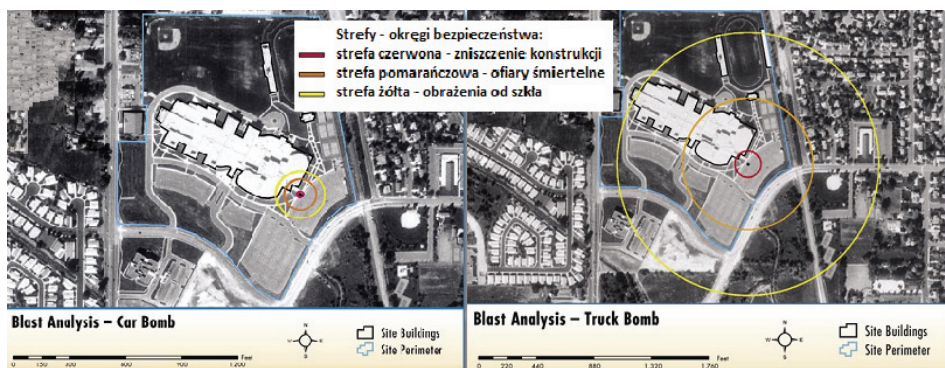
szary krytyczne powinny być odpowiednio zabezpieczone barierami ochronnymi uniemożliwiającymi m.in. wjazd samochodu-pułapki na posesję.

Określenie optymalnej granicy bezpieczeństwa dla danego obiektu nie jest prostym zadaniem. Poziom trudności zwiększa się wraz ze skomplikowaniem konstrukcji, jej lokalizacją i przeznaczeniem. W odniesieniu do obszarów zurbanizowanych o zdeternowanym planie zagospodarowania przestrzennego kryterium bezpiecznej odległości jest wręcz bezużyteczne. Dodatkową trudnością jest odpowiednie oszacowanie masy ładunku, co w przypadku przewidywania działań terrorystycznych jest dość dyskusyjne. Większość parametrów przyjmuje się na podstawie empirycznych oszacowań lub po prostu szuka się najdogodniejszej możliwej ich kombinacji.

Gdy struktura i wielkość dostępnego terenu pozwalają na przyjęcie różnych wariantów lokalizacji, plany ustala się zgodnie z następującymi głównymi zasadami:

- plan sytuacyjny obiektu tworzy się, biorąc pod uwagę wyznaczone krytyczne strefy budynku (słabe miejsca konstrukcyjne, zbiorowe pomieszczenia) i lokalizując je możliwie najdalej od parkingów i dojazdów,
- miejsca parkingowe umieszcza się na granicach działki,
- ogranicza się wyjazd pojazdów poza dozwolone strefy.

Wpływ lokalizacji ładunku wybuchowego na rozmiar uszkodzeń przedstawiono na przykładzie typowych ładunków samochodów-pułapek zdetonowanych na parkingu szkoły (rys. 5.34).



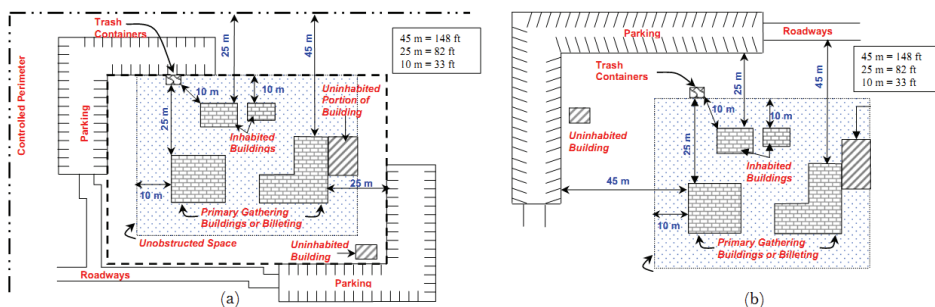
Rys. 5.34. Strefy rażenia w przypadku wybuchu samochodu i ciężarówki-pułapki według Department of Defense United States of America (UFC 4-010-01) [2003]

Minimalne odległości gwarantujące bezpieczeństwo na pewnym przyjętym poziomie są określone w UFC 4-010-01 [Department of Defense United States of America 2003]. W tabeli 5.3 oraz na rys. 5.35, będącym jej graficzną interpretacją zamieszczoną w tym dokumencie, podano minimalne odległości dla nowych i istniejących budynków w zależności od ładunku wybuchowego.

Tab. 5.3. Bezpieczna odległość obiektów w zależności od rodzaju ładunku wybuchowego [Department of Defense United States of America 2003 – UFC 4-010-01]

Lokalizacja	Kategoria budynku	Bezpieczna odległość i wymagania separacji obiektów			
		poziom bezpieczeństwa	odległość dla typowych konstrukcji	efektywna odległość	kategoria i masa ładunku wybuchowego*
Parkingi strzeżone, drogi	kwatery	niski	45 m	25 m	I 100 kg
	budynki zbiorowych zgromadzeń	niski	45 m	25 m	I 100 kg
	budynki użytkowe	bardzo niski	25 m	10 m	I 100 kg
Parkingi i drogi dojazdowe	kwatery	niski	25 m	10 m	II 25 kg
	budynki zbiorowych zgromadzeń	niski	25 m	10 m	II 25 kg
	budynki użytkowe	bardzo niski	10 m	10 m	II 25 kg
Pojemniki na śmieci	kwatery	niski	25 m	10 m	II 25 kg
	budynki zbiorowych zgromadzeń	niski	25 m	10 m	II 25 kg
	budynki użytkowe	bardzo niski	10 m	10 m	II 25 kg

*Wartości ładunków wybuchowych są wyrażone jako równoważnik trotylu.



Rys. 5.35. Schematyczny rzut z zaznaczonymi minimalnymi odległościami bezpieczeństwa: (a) obszary kontrolowane, (b) obszary niekontrolowane

5.6.5. Uprozczone kryteria oceny wybuchu i jego skutków

Pierwszym etapem przewidywania skutków wybuchu jest określenie prawdopodobnych obciążeń konstrukcji. W odniesieniu do powietrznych detonacji ładunków konwencjonalnych szacunek ogranicza się do podania odpowiedniej masy ładunku, wyrażonej jako równoważnik TNT, oraz odległości miejsca wybuchu od struktury. Na tej podstawie można określić przybliżoną postać impulsu ciśnienia powstającego w czasie detonacji.

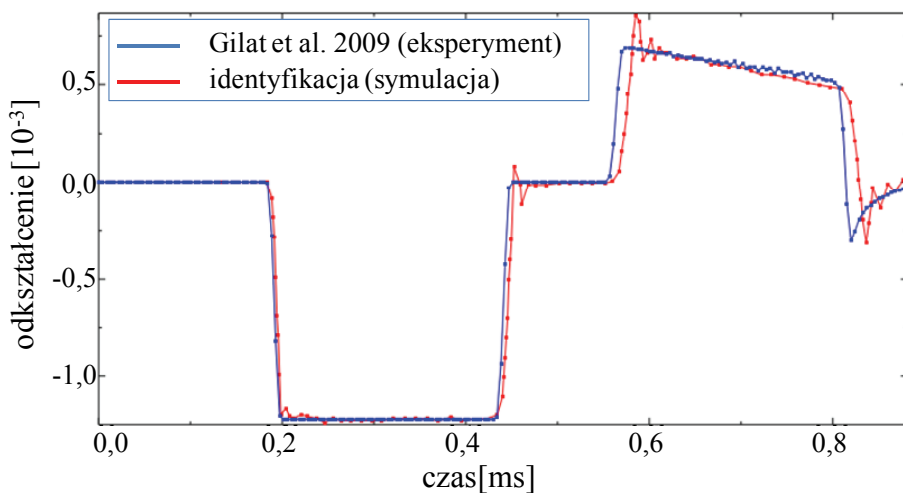
W większości przypadków, zwłaszcza podczas projektowania, można się ograniczyć do wyznaczenia szczytowej wartości ciśnienia fali uderzeniowej. Służą do tego różne narzędzia, np. monogramy (rys. 5.32), oraz programy komputerowe, takie jak: AtBast czy ConWep. Otrzymane wartości ciśnienia szczytowego można porównać z wartościami granicznymi i w przybliżony sposób określić wytrzymałość danej konstrukcji. W tabeli 5.4 podano szacunkowe graniczne wartości ciśnienia powodującego uszkodzenie różnych typów konstrukcji [Kinney i Graham 1985].

Tab. 5.4. Graniczne wartości ciśnienia powodującego uszkodzenia [Kinney i Graham 1985]

Rodzaj uszkodzenia	Graniczna wartość nadciśnienia [psi]
Typowe uszkodzenie szyb	0,15–0,22
Drobne uszkodzenia niektórych budowli	0,50–1,10
Wyboczenie paneli z blach metalowych	1,10–1,80
Zniszczenie betonowych ścian	1,80–2,90
Zawalenie drewnianej ramy	> 5,00
Poważne uszkodzenia konstrukcji stalowych	4,00–7,00
Duże uszkodzenia konstrukcji żelbetowych	6,00–9,00
Całkowite zniszczenie większości budynków	10,00–12,00

Dokładniej przewidywane skutki wybuchu można ocenić eksperymentalnie i za pomocą pomiarów. Jednak ze względu na wysokie koszty testów wybuchowych wykonuje się je jedynie na potrzeby wojskowych organizacji rządowych.

Istnieje jeszcze możliwość oceny skutków wybuchu za pomocą skomplikowanych analiz numerycznych, opartych na takich metodach, jak CFD i MES. Za pomocą uproszczonego modelu MES można odtworzyć z dobrą dokładnością wyniki złożonego testu. Na rysunku 5.36 przedstawiono przebieg dynamicznego ściskania miedzianej próbki z użyciem pręta SHPB (ang. *Split Hopkinson Pressure Bar*). W wyniku rozwiązania zagadnienia odwrotnego uzyskano odzwierciedlenie rzeczywistego testu zaprezentowanego w pracy Gilata, Schmidta i Walkera [2009].



Rys. 5.36. Numeryczna rekonstrukcja wyników testu dynamicznego SHPB, przeprowadzonego przez Gilata, Schmidta i Walkera [2009]

Dzięki obecnemu rozwojowi techniki komputerowej i dostępności zaawansowanych programów, opartych na silnie nieliniowych metodach dynamiki i nieliniowych modelach materiałów, można otrzymać wiele jakościowych analiz stosunkowo niskim kosztem. Programy oparte na metodzie elementów skończonych często są wykorzystywane do projektowania doświadczeń, które potwierdzają wysoką skuteczność i dokładność tych metod (przykłady analiz numerycznych podano w rozdziale 7).

Literatura

- Abaqus/CAE User's Manual 6.10 (2010), Dassault Systemes SIMULIA Corp., Providence, RI, USA.
- Baker W.E., Cox P.A., Westine P.S., Kulesz J.J., Strehlow R.A. (1983), *Explosion hazards and evaluation*, New York, Elsevier.
- Brode H.L. (1955), Numerical solution of spherical blast waves, *Journal of Applied Physics*, 26, s. 766–775.
- Department of Defense United States of America (2003), *Unified facilities criteria. DoD Minimum antiterrorism standards for buildings* (UFC 4-010-01).
- Department of Defense United States of America (2003), *Unified facilities criteria. DoD Minimum antiterrorism standoff distances for buildings* (UFC 4-010-02).
- FEMA (2003), *Reference manual to mitigate potential terrorist attacks against buildings*, Arkady, U.S. Department of Homeland Security.

- Gilat A., Schmidt T.E., Walker A.L. (2009), Full field measurement in compression and tensile Split Hopkinson Bar experiments, *Experimental Mechanics*, 49, s. 291–302.
- Hyde D.W. (1991), *Conventional weapons program (ConWep)*. U.S. Army Waterways Experimental Station, Vicksburg, USA.
- Kingery C.N., Bulmash G. (1984), *Airblast parameters from TNT spherical air burst and hemispherical surface burst*, Report ARBL-TR-02555, U.S. Army BRL, Aberdeen Proving Ground.
- Kinney G.F., Graham K.J. (1985), *Explosive shocks in air*, Springer.
- Mills C.A. (1987), The design of concrete structure to resist explosions and weapon effects, w: *Proceedings of the 1st Int. Conference on concrete for hazard protections*, Edinburgh, UK.
- Mougeotte C., Carlucci P., Recchia S., Novel H.J. (2010), Approach to Conducting Blast Load Analyses Using Abaqus/Explicit-CEL, w: *SIMULIA Customer Conference*.
- Newmark N.M., Hansen R.J. (1961), *Design of blast resistant structures. Shock and Vibration Handbook*, vol. 3, eds. Harris and Crede, New York, McGraw-Hill.
- Ngo T., Mendis P., Gupta A., Ramsay J. (2007), Blast Loading and Blast Effects on Structures – An Overview, *EJSE Special Issue: Loading on Structures*, s. 76–91.
- Remennikov A.M., Rose T. A. (2005), Modeling blast loads on buildings in complex city geometries, *Computers and Structures*, 83 (27), s. 2197–2205.
- Sielicki P.W., Łodygowski T. (2010), Pressure loadings on structure after explosion, w: *Seventh International Symposium on Impact Engineering*, Warsaw, Poland.
- Sielicki P.W. (2013), *Masonry failure under unusual impulse loading*, Poznań, Politechnika Poznańska.
- Smith P.D., Hetherington J.G. (1994), *Blast and ballistic loading of structures*, Great Britain, Butterworth-Heinemann Ltd.
- Smith P.D., Rose T.A. (2002), *Blast loading and building robustness*, Wiley.
- Smith P.D., Rose T.A. (2005), *Blast wave propagation in city streets – an overview*, Wiley, Cranfield University.
- Unified Facilities Criteria (2008), *Structures to resist the effects of accidental explosions* (UFC 3-340-02).
- Wilkinson C.R., Anderson J.R. (2003), *An introduction to detonation and blast for the non-specialist*, Edinburgh, South Australia Australian Government Department of Defense.

6. Prawa konstytutywne materiałów stosowanych w budownictwie

6.1. Beton

W budownictwie stosuje się różne materiały – od betonu i żelbetu przez konstrukcje drewniane aż po konstrukcje stalowe. Zastosowanie określonego materiału i technologii jest często wymuszone przez wymagania użytkowe i cenę. Aby móc efektywnie projektować konstrukcje budowlane, należy brać pod uwagę właściwości materiałów i ich specyfikę, np. ciągliwość stali i dużą wytrzymałość zarówno przy ściskaniu, jak i przy rozciąganiu. Niestety, niektóre materiały stosowane w budownictwie, np. beton, odznaczają się kruchością podczas rozciągania, stąd konieczność ich wzmacniania. Korzystne jest jego wzmocnienie przy dużych prędkościach odkształcenia.

Beton jest materiałem kompozytowym składającym się z kruszywa, cementu i wody, które po zhydratyzowaniu tworzą sztuczną skałę. W nieliniowej analizie konstrukcji betonowych i żelbetowych bardzo ważne jest przyjęcie odpowiedniego modelu konstytutywnego betonu, gdyż beton poddany obciążeniom wyjątkowym, wykraczającym poza granice sprężystych odkształceń, pęka, kruszy się i odspaja od zbrojenia. Są to silnie nieliniowe zjawiska, spowodowane kompozytową, złożoną mikrobudową tego materiału, które utrudniają symulację numeryczną jego zachowania.

Quasi-statyczne właściwości betonu

Najważniejszą cechą betonu, braną pod uwagę podczas projektowania konstrukcji, jest wytrzymałość na ściskanie. Wskazuje ona ogólnie na jego jakość i budowę wewnętrzną. Istnieją różne testy wytrzymałościowe betonu, za pomocą których określa się jego wytrzymałość na ściskanie, rozciąganie i ścinanie. Dynamiczna wytrzymałość na rozciąganie i ściskanie stanowi odrębną kategorię i jest omówiona w kolejnych podrozdziałach.

Wytrzymałość betonu na ściskanie jest testowana za pomocą prasy hydraulicznej. Badaniom poddaje się walcowe próbki o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm. Dopuszczalne jest również testowanie sześciennych kostek o długości krawędzi 100, 150 lub 200 mm. Próbkę poddaje się działaniu siły ściskającej aż do zniszczenia. Wytrzymałość jest oznaczana jako wartość stosunku maksymalnej siły do aktualnego pola powierzchni ściskanej.

Spśród wielu równań opisujących krzywą naprężenie–odkształcenie dobrą korelację z większością wyników wykazuje równanie [Neville 2000]:

$$\sigma = \frac{E\varepsilon}{1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2} \quad (6.1)$$

gdzie: σ – naprężenie,

ε – odkształcenie,

ε_0 – odkształcenie odpowiadające maksymalnemu naprężeniu σ_{\max} .

Przez E oznaczono początkowy, styczny moduł sprężystości, co do którego przyjmuje się, że jego wartością jest podwójna wartość modułu siecznego odpowiadającego maksymalnym naprężeniom σ_{\max} , czyli

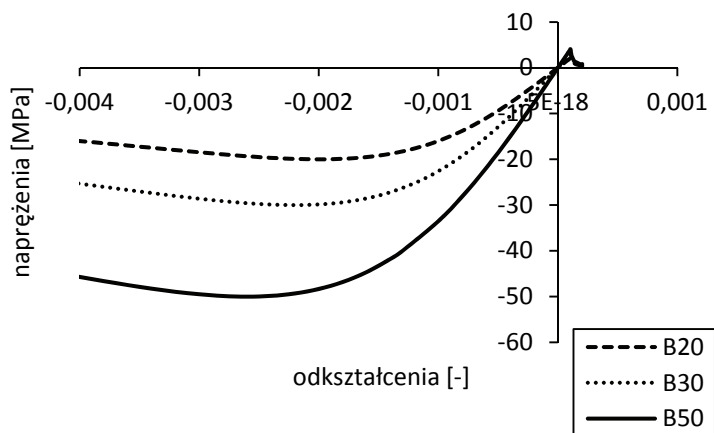
$$E = \frac{2\sigma_{\max}}{\varepsilon_0} \quad (6.2)$$

Powyższą zależność można przedstawić graficznie (rys. 6.1) dla różnych klas betonu zwykłego (od B20 do B50). Wszystkie wykresy mają wspólną cechę, którą jest początkowa liniowość w strefie ściskania i rozciągania. Przyjmuje się, że beton zachowuje liniowość do około 60% maksymalnych naprężeń. Powyżej tej granicy wykres ulega zakrzywieniu, tzn. zmienia się współczynnik proporcjonalności E . W granicach od 75% do 90% zakrzywienie wzrasta gwałtownie. Jest to spowodowane coraz większym zniszczeniem struktury wewnętrznej betonu. Krzywa osiąga ekstremum równe wytrzymałości na ściskanie, po czym zaczyna opadać. Wskazuje to, że beton ulega degradacji aż do zniszczenia przez pokruszenie.

Rzeczywista wytrzymałość betonu na rozciąganie jest znacznie mniejsza niż wytrzymałość teoretyczna, obliczona na podstawie kohezji molekularnej i energii powierzchniowej ciała doskonale jednorodnego, wynosząca 10,5 GPa [Neville 2000]. Wytrzymałość rzeczywista zależy jednak w dużej mierze od przyczepności ziaren kruszywa do stwardniałego zaczynu cementowego. Ze względu na duże zróżnicowanie ziaren kruszywa wyniki tego typu badań wykazują duże odchylenie standardowe i są zależne od kształtu oraz wielkości próbek. Dlatego w praktyce budowlanej wytrzymałość na rozciąganie uzależnia się od wytrzymałości na ściskanie. Istnieje kilka wzorów empirycznych wiążących wytrzymałość na rozciąganie z wytrzymałością na ściskanie. Najczęściej mają one postać:

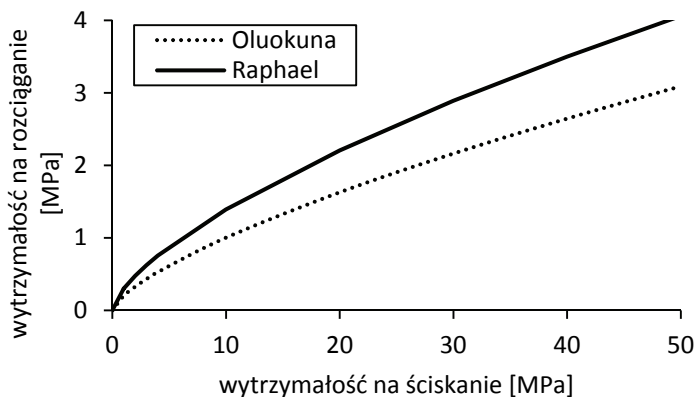
$$f_t = k(f_c)^n \quad (6.3)$$

gdzie k i n są współczynnikami. Najlepszymi parametrami są $k = 0,3$ i $n = 2/3$ [Raphael 1984]. Krzywą odpowiadającą tym parametrom przedstawiono na rys. 6.2. W literaturze można znaleźć również inne wartości: $k = 0,2$ i $n = 0,7$ [Oluokun 1991].

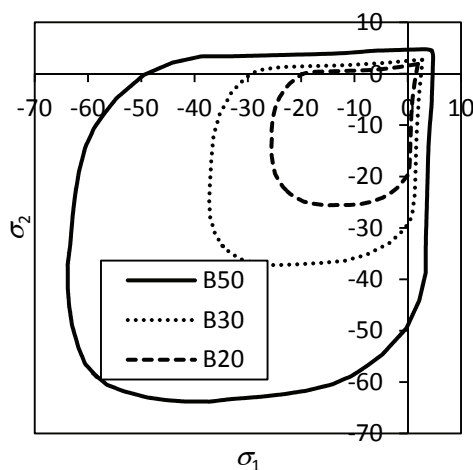


Rys. 6.1. Wyniki jednoosiowego testu betonu poddanego ścisnaniu i rozciąganiu

Istnieje możliwość zbadania wytrzymałości betonu na rozciąganie. Najczęściej służą do tego specjalne testy, które prowadzą do rozłupania próbki betonowej podczas jej ścisnania. Jedną z nich jest metoda brazylijska. Prawidłowy obraz zniszczenia próbki w tym badaniu to pęknięcie w płaszczyźnie wyznaczonej liniami przyłożenia siły. Istnieją również inne metody badania wytrzymałości betonu na rozciąganie, między innymi metoda bezpośrednia [Swaddiwudhiponga, Hai-Rong Lub i Wee 2003].



Rys. 6.2. Zależność wytrzymałości na rozciąganie od wytrzymałości na ścisnaniu [Neville 2000]



Rys. 6.3. Krzywe zniszczenia w dwuosiowym stanie naprężenia, gdy końcowe ograniczenia są wyeliminowane [Kupfer, Hilsdo i Rusch 1969]

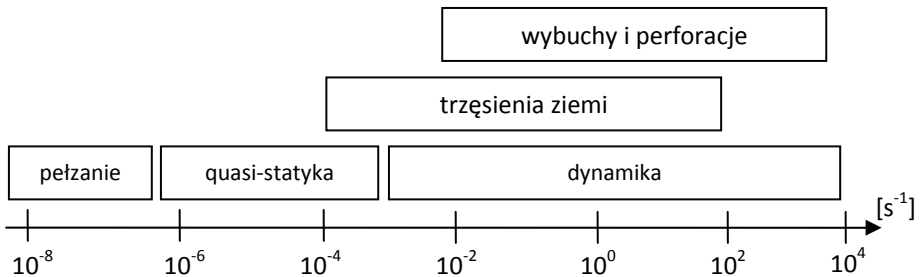
Zachowanie w płaskim stanie naprężenia jest istotną cechą betonu. Na rysunku 6.3 przedstawiono krzywe zniszczenia uzyskane w badaniach eksperymentalnych dla trzech przykładowych klas betonu [Kupfer, Hilsdo i Rusch 1969]. Na osiach rzędnej i odciętej są naprężenia główne, odpowiednio σ_1 i σ_2 . Interakcja naprężeń (sprężenie) jest porównywalna dla różnych klas betonu zwykłego [Kupfer, Hilsdo i Rusch 1969].

Dynamiczne właściwości betonu

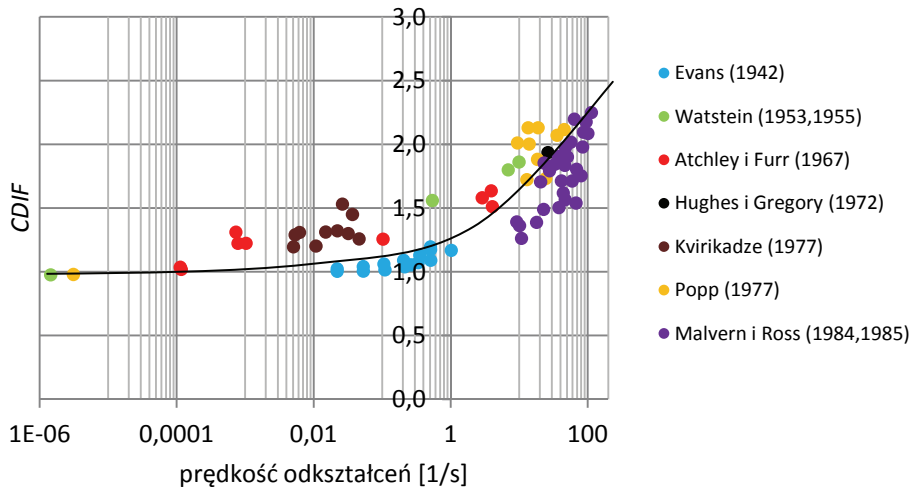
W przypadku przekroczenia dynamicznej wytrzymałości betonu impulsowe obciążenia konstrukcji powodują ich zniszczenie lub uszkodzenie. Skutek obciążeń dynamicznych bardzo często jest nieprzewidywalny. Na rysunku 6.4 przedstawiono różnego rodzaju obciążenia oraz odpowiadające im zakresy prędkości odkształceń od pełzania przez procesy quasi-statyczne aż do zderzeń, wybuchów i trzęsień ziemi (procesy dynamiczne). W wyniku obciążenia konstrukcji betonowych falą uderzeniową wywołaną eksplozją materiału wybuchowego dochodzi do dużych prędkości odkształceń, rzędu 1000 1/s.

Niżej omówiono wpływ dużych prędkości odkształceń na dynamiczną wytrzymałość przy ściskaniu i rozciąganiu betonu, ponieważ od początku XX wieku wiadomo, że na jego wytrzymałość zasadniczy wpływ ma prędkość deformacji [Abrams 1917]. Wyniki najnowszych badań wielokrotnie to potwierdziły [Klepaczko i Brara 2001; Ross, Tedesco i Kuenen 1992; Bischoff i Perry 1991]. Szczegółową analizę wyników badań dynamicznej wytrzymałości betonu na ściskanie przedstawili w swojej pracy Bischoff i Perry [1991]. Na rysunku 6.5 pokazano rezultaty uzyskane przez różnych badaczy analizujących wpływ pręd-

kości odkształceń na dynamiczną wytrzymałość betonu na ściskanie. Na osi odciętych zaznaczono prędkość odkształceń, a na osi rzędnych $CDIF$, czyli współczynnik wzmocnienia wytrzymałości przy ściskaniu (ang. *Compressive Dynamic Increase Factor*). Wartość $CDIF$ nieznacznie przekracza 2. Wykres na rys. 6.5 pokazuje ogólną tendencję – wzrost prędkości odkształceń na skutek ściskania powoduje wzrost wytrzymałości dynamicznej betonu.



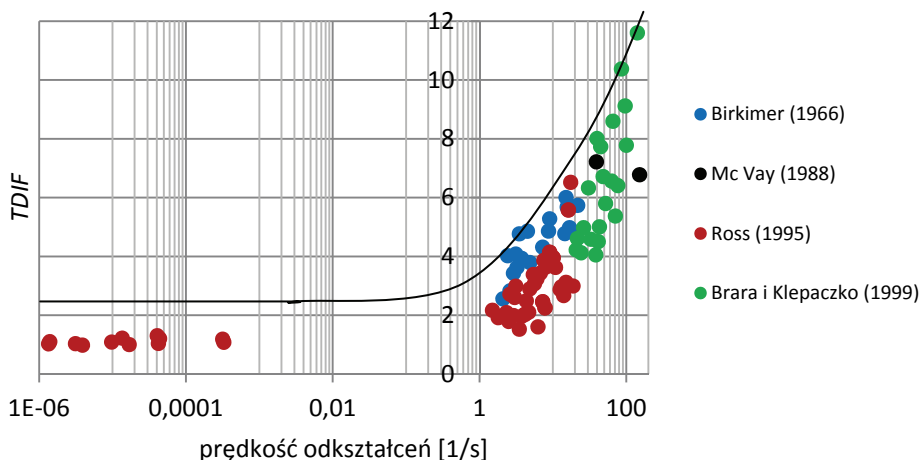
Rys. 6.4. Prędkość odkształceń na skutek różnych obciążeń wyjątkowych



Rys. 6.5. Wpływ prędkości odkształceń na $CDIF$ (opracowano na podstawie [Bischoff i Perry 1991])

Wyniki wybranych badań eksperymentalnych dynamicznej wytrzymałości na rozciąganie przedstawiono na rys. 6.6. Na osi odciętych podano prędkość odkształceń, a na osi rzędnych $TDIF$, czyli współczynnik wzmocnienia wytrzymałości przy rozciąganiu (ang. *Tensile Dynamic Increase Factor*). Wykres na rys. 6.6 pokazuje także tendencję wzrostu wytrzymałości dynamicznej wraz ze wzrostem prędkości odkształceń. Podczas dynamicznego rozciągania współczynnik $TDIF$ osiąga wartość 12. Wyniki badań są zróżnicowane, po-

nieważ używano różnych rodzajów betonu, niekiedy o dużej niejednorodności. W nowszych badaniach jako materiał testowy wykorzystywano mikrobeton o wielkości ziaren nieprzekraczającej 2 mm [Klepaczko i Brara 2001]. Kolejnym powodem różnych wyników były metody określania wytrzymałości. Stosowano testy bezpośredniego rozciągania [Ross, Tedesco i Kuenen 1992], ale także testy z użyciem pręta Hopkinsona [Klepaczko i Brara 2001; Brara i Klepaczko 2006].



Rys. 6.6. Porównanie różnych wyników badań eksperymentalnych dynamicznej wytrzymałości na rozciąganie [Brara i Klepaczko 2006]

Dynamiczne kryteria zniszczenia

W przypadku obciążeń dynamicznych – ze względu na wpływ prędkości odkształceń, których wzrost powoduje zwiększenie wytrzymałości dynamicznej betonu – ogólną postać kryterium zniszczenia można zapisać następująco:

$$f(\sigma_{ij}, \dot{\epsilon}_{ij}) = 0 \quad (6.4)$$

Gdy rozpatrywanym materiałem są metale, funkcję f często rozkłada się na sumę lub iloczyn funkcji [Litoński 1977; Rusinek 2000]. Zatem równanie (6.4) może przyjąć następującą postać:

$$g(\sigma_{ij}) \cdot h(\dot{\epsilon}_{ij}) = 0 \quad (6.5)$$

W odniesieniu do funkcji g możliwe jest zastosowanie dowolnego kryterium quasi-statycznego, a w przypadku funkcji wzmocnienia h należy uwzględnić

przyrost wytrzymałości *TDIF* i *CDIF*. Trzy przykładowe funkcje *g* przedstawiono na rys. 6.7 w płaskim stanie naprężenia. Są to funkcje zaproponowane przez Podgórskiego, Mroza i Willama-Wernkego. Pierwsza z nich jest pięcioparametrowa, dwie pozostałe trzyparametrowe. Często stosuje się wzmocnienie izotropowe, co oznacza, że *DIF* zwiększa jeden z parametrów zastosowanego kryterium, a mianowicie ten, który decyduje o jego rozmiarach.

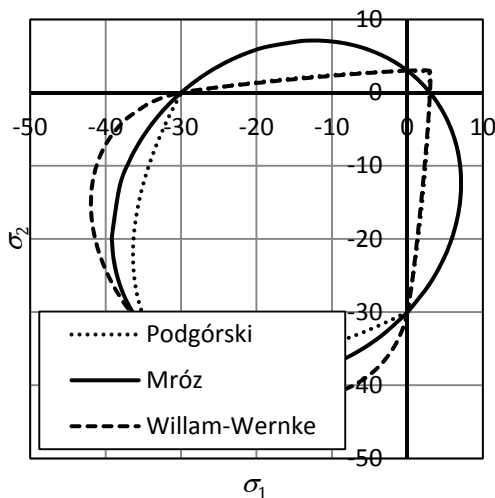
Inne kryterium zniszczenia materiałów, oparte na koncepcji kumulacji zniszczenia, zaprezentowali Tuler i Butcher [1968] oraz Campbell [1953] [Jankowiak 2011]. Znaleźli oni dobrą korelację pomiędzy dynamiczną wytrzymałością, a czasem trwania impulsu naprężenia. Naprężenie niszczące w tym kryterium określono w następujący sposób:

$$\int_0^{t_c} (\sigma^{eq} - \sigma_0^{eq})^\lambda dt = C \quad (6.6)$$

gdzie: λ , σ_0^{eq} i C – stałe materiałowe,

t_c – czas zniszczenia wyznaczany przez kryterium.

Wielkość σ^{eq} jest naprężeniem ekwiwalentnym, zgodnym z wybranym kryterium zniszczenia. Do metali często stosuje się naprężenia sprowadzone według kryterium Hubera-Misesa-Henky'ego, a do betonu sprowadzone według kryterium Druckera-Pragera, Lubliner'a i Mroza [Jankowiak 2011].



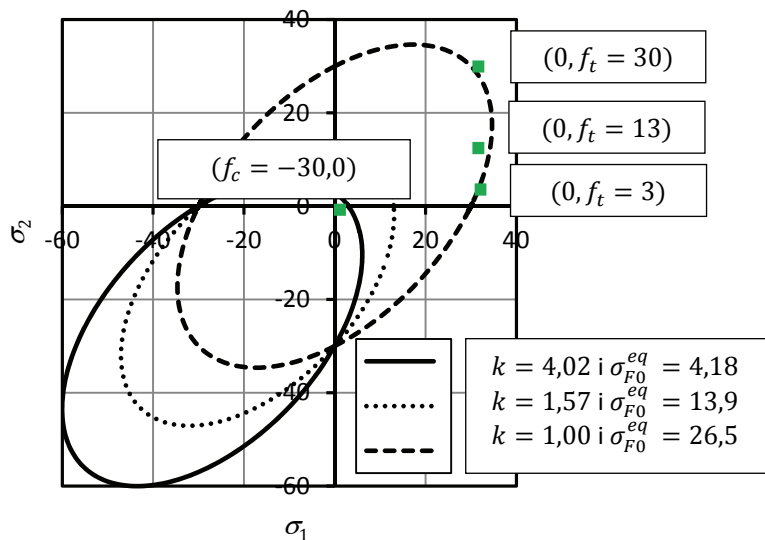
Rys. 6.7. Porównanie możliwych do zastosowania funkcji *g*

Inne kumulatywne kryterium zniszczenia przedstawił Freund [1993]. Ma ono postać:

$$\int_0^{t_c} \left[\frac{\sigma^{eq}}{\sigma_0^{eq}} - 1 \right]^\beta dt = D \quad (6.7)$$

gdzie: σ_0^{eq} , β i D – stałe materiałowe.

Wytrzymałość betonu zarówno na ściskanie, jak i na rozciąganie zależy od prędkości odkształceń. Jedną z możliwości uwzględnienia wpływu prędkości odkształceń na wytrzymałość betonu jest kumulatywne kryterium zniszczenia (KKZ). Początkowo kryterium to było wykorzystywane do opisu zniszczenia metali [Campbell 1953]. Następnie zostało zastosowane do modelowania zniszczenia betonu [Brara i in. 2001; Stolarski 2004] za pomocą metody elementów dyskretnych [Cundall i Strack 1979].



Rys. 6.8. Powierzchnia zniszczenia w przestrzeni naprężeń głównych dla różnych parametrów k i σ_{F0}^{eq} oraz $\sigma_3 = 0$

Kryterium to uogólniono, aby prawidłowo opisywało zniszczenie betonu w trójosiowym stanie naprężenia [Jankowiak 2011] i zaimplementowano jako procedurę VUMAT w programie Abaqus/Explicit. Czas zniszczenia materiału poddanego impulsowi naprężenia jest określony przez kumulatywne kryterium zniszczenia. W formie całkowitej ma ono postać:

$$t_{c0} = \int_0^{t_c} \left(\frac{\sigma_F^{eq}(t)}{\sigma_{F0}^{eq}} \right)^{\alpha(T)} dt, \text{ jeśli } \sigma_F^{eq}(t) > \sigma_{F0}^{eq} \quad (6.8)$$

W równaniu (6.8) występują: t_{c0} , czyli najdłuższy krytyczny czas $\alpha(T)$, będący parametrem, a dokładniej wartością zależną od temperatury T , związaną z energią aktywowaną podczas procesu separacji (zerwania więzów kohezji), oraz σ_{F0}^{eq} , czyli quasi-statyczna ekwiwalentna wytrzymałość betonu na rozciąganie. Do opisu deformacji w trójosiowym stanie naprężenia użyto następującej miary naprężeń [Geers, Borst i Peerlings 2000]:

$$\sigma_F^{eq} = \frac{k-1}{2k(1-2\nu)} I_1 + \frac{1}{2k} \sqrt{\left(\frac{k-1}{1-2\nu} I_1 \right)^2 + \frac{6k}{(1-\nu)^2} J_2} \quad (6.9)$$

gdzie: I_1, J_2 – pierwszy i drugi niezmiennik tensora i dewiatora tensora naprężenia,
 σ_{F0}^{eq} – uogólnienie ekwiwalentnych naprężeń Hubera-Misesa-Hencky'ego [Geers, Borst i Peerlings 2000],
 k – wpływa na kształt powierzchni zniszczenia w przestrzeni naprężeń głównych i decyduje o przesunięciu powierzchni w kierunku strefy ściskanej.

Powyższa miara naprężeń może być użyta do określenia wytrzymałości betonu przy obciążeniach quasi-statycznych.

Model konstytutywny betonu

W dokładnej analizie konstrukcji betonowej do symulacji uszkodzenia i zniszczenia pod wpływem obciążenia wyjątkowego niezbędne jest użycie złożonego modelu materiału, w którym będą uwzględnione: właściwości sprężysto-plastyczne, inicjacja uszkodzenia materiału przy ściskaniu i rozciąganiu w formie energetycznej, zregulowana ewolucja uszkodzenia i zniszczenie uzależnione od stanu naprężenia, wzmocnienie zależne od prędkości odkształceń. W celu opisanie tych właściwości zidentyfikowano następujące parametry materiałowe betonu klasy C30:

$$\begin{aligned} G &= 11460 \text{ MPa}, K = 12550 \text{ MPa}, \rho = 2320 \cdot 10^{-12} \text{ t/mm}^2 \\ \alpha &= 14,5 \text{ MPa}, \alpha_1 = 0,7473, \alpha_2 = 0,66 \\ \lambda &= 10,5 \text{ MPa}, \lambda_1 = 0,17, \lambda_2 = 0,16 \\ \beta &= 0,01929 \text{ MPa}^{-1}, \beta_1 = 0,07057 \text{ MPa}^{-1}, \beta_2 = 0,07057 \text{ MPa}^{-1} \\ \theta &= 0,2965, \theta_1 = 1,151 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}, \theta_2 = 1,387 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1} \\ R &= 5, B = 100, pwrc = 5, X_0 = 90,54 \text{ MPa}, G_{fc} = 6,838 \text{ MPa} \cdot \text{mm} \\ N_t &= 0,48, W = 0,05, D = 0,1, N_c = 0,78, D_1 = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
G_{ft} &= 0,06838 \text{ MPa} \cdot \text{mm}, \quad \eta_{0t} = 6,176 \cdot 10^{-5} \text{ s}, \quad D_2 = 3,49 \cdot 10^{-7} \text{ MPa}^2 \\
G_{fs} &= 0,06838 \text{ MPa} \cdot \text{mm}, \quad \eta_{0c} = 1,003 \cdot 10^{-4} \text{ s}, \quad p_{mod} = 0 \\
p_{wrt} &= 1, \quad S_{rate} = 1, \quad \tau_{0c} = 0,1322 \text{ MPa}^{0,5}, \quad \tau_{0t} = 0,0152 \text{ MPa}^{0,5} \\
repow &= 1, \quad \kappa_0 = 45 \text{ MPa}
\end{aligned}$$

Zakres sprężysty jest w pełni opisany dwoma parametrami: modułem ścinania G i modułem odkształcenia objętościowego K . Gęstość betonu również musi być określona w analizie dynamicznej, gdy siły bezwładności są znaczące. W modelu zastosowano stowarzyszone prawo płynięcia, a warunek uplastycznienia ma następującą postać:

$$f(J_1, J_2', J_3', \kappa) = J_2' - \mathfrak{R}^2 F_f^2 F_c \quad (6.10)$$

gdzie: J_1 – pierwszy niezmiennik tensora naprężenia,

J_2' – drugi niezmiennik dewiatora tensora naprężenia,

J_3' – trzeci niezmiennik dewiatora tensora naprężenia,

κ – zmienna wzmocnienia.

Powierzchnia zniszczenia przy ścinaniu F_f ma następującą postać:

$$F_f = \alpha - \lambda e^{-\beta J_1} + \theta J_1 \quad (6.11)$$

Parametry materiałowe α , β , λ i θ służą do określenia powierzchni zniszczenia przy ścinaniu. W równaniu (6.10) użyto funkcji skalowania wytrzymałości (Rubina) do zredukowania wytrzymałości przy skręcaniu i trójosiowym rozciąganiu. Ma ona następującą postać:

$$\mathfrak{R} = \begin{cases} Q_1 = \alpha_1 - \lambda_1 e^{-\beta_1 J_1} + \theta_1 J_1 & \text{skręcanie} \\ Q_2 = \alpha_2 - \lambda_2 e^{-\beta_2 J_1} + \theta_2 J_1 & \text{trójosiowe rozciąganie} \end{cases} \quad (6.12)$$

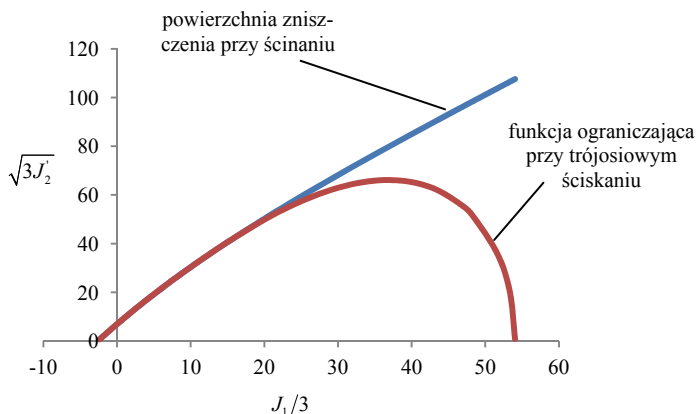
Parametry α_1 , α_2 , β_1 , β_2 , λ_1 , λ_2 , θ_1 i θ_2 określają funkcję skalowania wytrzymałości. Funkcja potencjału plastycznego $f(J_1, J_2', J_3', \kappa)$ jest ograniczona w przypadku trójosiowego ściskania F_c za pomocą następującego równania:

$$F_c(J_1, \kappa) = 1 - \frac{[J_1 - L(\kappa)] [|J_1 - L(\kappa)| + J_1 - L(\kappa)]}{2[X(\kappa) - L(\kappa)]^2} \quad (6.13)$$

przy czym funkcje $L(\kappa)$ i $X(\kappa)$ mają postać:

$$L(\kappa) = \begin{cases} \kappa, & \text{gdy } \kappa > \kappa_0 \\ \kappa_0, & \text{gdy } \kappa \leq \kappa_0 \end{cases} \quad \text{i} \quad X(\kappa) = L(\kappa) + RF_f(L(\kappa)) \quad (6.14)$$

Funkcje te określają wzmocnienie przy trójosiowym ściskaniu. Parametry R i κ_0 określają kształt funkcji ograniczającej. Kształt funkcji zniszczenia przy ścinaniu wraz z ograniczeniem przy ściskaniu przedstawiono na rys. 6.9.



Rys. 6.9. Warunek plastyczności w przekroju południkowym

Funkcja ograniczająca przy trójosiowym ściskaniu zmienia swoje położenie, gdy wzrastają odkształcenia plastyczne (zmiana objętości), zgodnie ze wzorem:

$$\varepsilon_v^{pl} = W \left(1 - e^{-D_1(X-X_0) - D_2(X-X_0)^2} \right) \quad (6.15)$$

gdzie ε_v^{pl} to objętościowe odkształcenia plastyczne, a parametry W , D_1 , D_2 , X_0 określają rozciąganie i kurczenie funkcji ograniczającej, wyrażone równaniem (6.15).

W modelu parametr uszkodzenia d jest używany do określenia tensora naprężenia z uszkodzeniem σ_{ij}^d za pomocą lepko-plastycznego tensora naprężenia bez uszkodzenia σ_{ij}^{vp} , zgodnie z równaniem:

$$\sigma_{ij}^d = (1-d) \sigma_{ij}^{vp} \quad (6.16)$$

W modelu występują dwa niezależne parametry uszkodzenia w ściskaniu (ściananiu) i rozciąganiu:

$$\begin{aligned}
\tau_c &= \sqrt{\frac{1}{2} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij}} & \text{dla} & \begin{cases} J_1 \\ \tau_c \geq \tau_{0c} \end{cases} & \text{energia ściskania} \\
\tau_t &= \sqrt{E \varepsilon_{\max}^2} & \text{dla} & \begin{cases} J_1 \\ \tau_t \geq \tau_{0t} \end{cases} & \text{energia rozciągania}
\end{aligned} \tag{6.17}$$

Parametry τ_{0c} i τ_{0t} służą do określenia granic sprężystości, odpowiednio przy ściskaniu i rozciąganiu. Dwie funkcje są używane do określenia osłabienia (uszkodzenia) niezależnie w ściskaniu (ścinaniu) i rozciąganiu:

$$\begin{aligned}
d(\tau_c) &= \frac{d}{B} \max \left[\frac{1+B}{1+Be^{-A(\tau_c - \tau_{0c})}} - 1 \right] & \text{ciągłe uszkodzenie} \\
d(\tau_t) &= \frac{0.999}{D} \max \left[\frac{1+D}{1+De^{-C(\tau_t - \tau_{0t})}} - 1 \right] & \text{kruche uszkodzenie}
\end{aligned} \tag{6.18}$$

Parametry A i C są równe charakterystycznej długości l_d . Dodatkowo parametr A może być zredukowany za pomocą następującego równania:

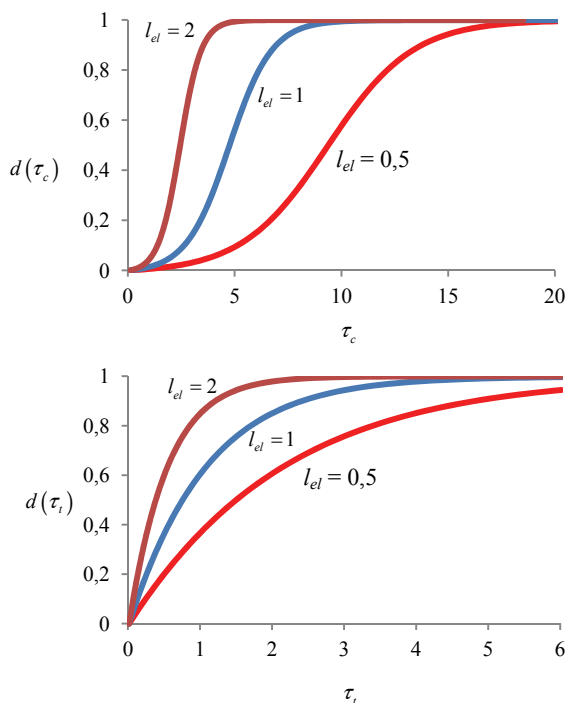
$$A = A(d_{\max} + 0,001)^{p_{\text{mod}}} \tag{6.19}$$

Parametry B , D , d_{\max} , p_{mod} określają kształt funkcji obciążenia przy ściskaniu i rozciąganiu. Funkcje te pokazano na rys. 6.10 dla dwóch mechanizmów uszkodzenia i różnych wielkości elementów skończonych.

W modelu zastosowano reguły zdefiniowanie energii uszkodzenia G_f , która zależy od mechanizmu uszkodzenia (stanu naprężenia), zgodnie z formułą:

$$\begin{aligned}
G_f &= G_{fs} + \left(\frac{J_1}{\sqrt{3J_2}} \right)^{pwrc} (G_{fc} - G_{fs}) & \text{ściskanie} \\
G_f &= G_{fs} + \left(\frac{-J_1}{\sqrt{3J_2}} \right)^{pwrt} (G_{ft} - G_{fs}) & \text{rozciąganie}
\end{aligned} \tag{6.20}$$

Parametry G_{fc} , G_{ft} , G_{fs} określają energię pęknięcia podczas czystego ścinania, ściskania i rozciągania, a $pwrt$, $pwrc$ są parametrami materiałowymi.



Rys. 6.10. Funkcje osłabienia (uszkodzenia) w ściskaniu (powyżej) i rozciąganiu (poniżej)

Sformułowanie lepko-plastyczne zastosowano w celu uwzględnienia wpływu prędkości odkształcenia, zgodnie z równaniem:

$$\sigma_{ij}^{vp} = (1 - \gamma) \sigma_{ij}^T + \gamma \sigma_{ij}^p, \quad \text{gdzie} \quad \gamma = \frac{\Delta t / \eta}{1 + \Delta t / \eta} \quad (6.21)$$

Lepko-plastyczny tensor naprężenia bez uszkodzenia σ_{ij}^{vp} jest obliczany na podstawie sprężystego próbnego tensora naprężenia σ_{ij}^T i nielepkiego tensora naprężenia σ_{ij}^p . Zmienna η (efektywny współczynnik płynności) w równaniu (6.21) jest obliczana niezależnie dla ściskania i rozciągania, zgodnie z zależnością:

$$\eta = \eta_s + \left(\frac{J_1}{\sqrt{3J_2}} \right)^{pwrc} (\eta_c - \eta_s) \quad \text{ściskanie} \quad (6.22)$$

$$\eta = \eta_s + \left(\frac{-J_1}{\sqrt{3J_2}} \right)^{pwrt} (\eta_t - \eta_s) \quad \text{rozciąganie}$$

Zmienne η_s , η_t , η_c obliczane są w następujący sposób:

$$\eta_t = \frac{\eta_{0t}}{\dot{\epsilon}^{N_t}}, \quad \eta_c = \frac{\eta_{0c}}{\dot{\epsilon}^{N_c}} \quad i \quad \eta_s = S_{rate} \eta_t \quad (6.23)$$

Parametry materiałowe η_{0t} , η_{0c} , N_t , N_c , S_{rate} pozwalają dopasować model do testów jednoosiowego ściskania, rozciągania i ścinania. Zmienna $\dot{\epsilon}$ określa efektywną prędkość odkształceń. Energia uszkodzenia zależy od prędkości odkształceń, zgodnie z zależnością:

$$G_f^{rate} = G_f \left(1 + \frac{E \dot{\epsilon} \eta}{f'} \right)^{repow} \quad (6.24)$$

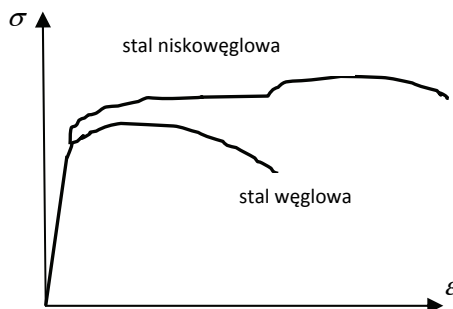
Parametr *repow* pozwala zwiększyć energię uszkodzenia wraz z prędkością odkształceń, a f' jest wewnętrznie obliczane przez program i określa wytrzymałość przed dodaniem członu związanego z prędkością deformacji. Dokładniejszy opis można znaleźć w podręczniku programu LS-DYNA. Wszystkie parametry materiałowe zidentyfikowano za pomocą testów eksperymentalnych (statycznych i dynamicznych) [Bischoff i Perry 1991; Brara i Klepaczek 2006; Kupfer, Hilsdo i Rusch 1969; Neville 2000; Users Manual 2007].

6.2. Stal

Stal jest materiałem często stosowanym w budownictwie. Może być wykorzystana do budowy konstrukcji stalowych lub jako wzmocnienie konstrukcji żelbetowych.

Właściwości statyczne

Typowy przebieg krzywej naprężenie–odkształcenie dla stali klasy AIII-N w próbie rozciągania przedstawiono na rys. 6.11.



Rys. 6.11. Wykres naprężenie–odkształcenie jednoosiowo rozciąganej stali niskowęglowej i węglowej

Stal jest stopem żelaza z węglem. W ujęciu mikroskopowym jest to materiał o strukturze krystalograficznej. W skali makro stal jest traktowana jako materiał jednorodny i izotropowy. W zależności od ilości węgla wyróżnia się dwa główne rodzaje stali: niskowęglową – o dużej ciągliwości i wytrzymałości na rozciąganie oraz węglową – o kruchej strukturze i bez wyraźnej granicy plastyczności. W budownictwie stosuje się na ogół stal niskowęglową.

Oprócz testu jednoosiowego rozciągania powszechnie stosuje się również w odniesieniu do materiałów ciągliwych test jednoosiowego ściskania. W przypadku tego testu niezbędne jest uwzględnienie wpływu tarcia na wynik testu. Można zastosować w tym celu model Malinowskiego-Klepaczki [Jankowiak, Rusinek i Łodygowski 2011].

Właściwości dynamiczne

Pod wpływem dużych prędkości odkształceń stali dochodzi do jej wzmocnienia (wzrost wytrzymałości). Stal wytrzymuje większe obciążenia, niż by to wynikało z próby statycznej. Głównym testem, za pomocą którego określa się dynamiczne zachowanie stali, jest dynamiczne ściskanie z użyciem pręta SHPB. Podczas dynamicznego ściskania można określić krzywą naprężenia–odkształcenia dla różnych prędkości odkształceń. W teście tym w zależności od wielkości próbki można uzyskać prędkości odkształceń rzędu 10000 1/s. Należy w nim uwzględnić wpływ tarcia na wyniki – ogólnie podnosi ono poziom naprężeń. W tym celu można wykorzystać wspomniany już model Malinowskiego-Klepaczki. Możliwe jest również zastosowanie innych testów, np. testu Taylora lub testu z bezpośrednim uderzeniem pręta w próbkę. Uzyskuje się wówczas prędkości odkształceń rzędu nawet 100 000 1/s.

Model konstytutywny stali

Symulując zachowanie stali w konstrukcjach budowlanych obciążonych dynamicznie, stosuje się często model wzmocnienia Johnsona-Cooka (JC). Model ten pozwala wyznaczyć liniową zależność naprężeń od prędkości odkształceń w przestrzeni logarytmicznej. Gdy temperatura ma stałą wartość, model JC przyjmuje następującą postać:

$$\sigma_{eq} = (A + B\varepsilon_{pl}^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{pl}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \quad (6.25)$$

gdzie: σ_{eq} – ekwiwalentne naprężenie,

ε_{pl} – ekwiwalentne odkształcenie plastyczne,

$\dot{\varepsilon}_{pl}$ – prędkość odkształcenia plastycznego.

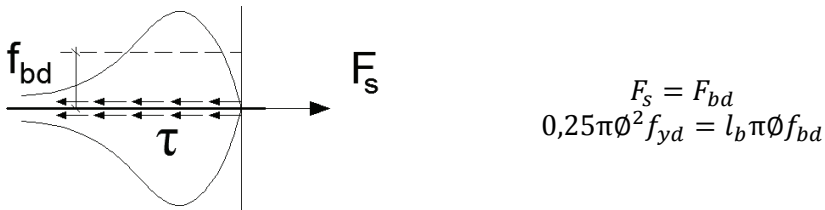
Wartości parametrów A , B , n , C i $\dot{\varepsilon}_0$ występujących w powyższym równaniu dla zbrojenia klasy III podano w tabeli 6.1.

Tab. 6.1. Wartości parametrów modelu Johnsona-Cooka

Parametry	Prędkość odkształceń $10^{-4} \text{ s}^{-1} < \dot{\epsilon} < 1 \text{ s}^{-1}$	Prędkość odkształceń $1 \text{ s}^{-1} < \dot{\epsilon} < 10^5 \text{ s}^{-1}$
A	482 MPa	523 MPa
B	1192 MPa	1260 MPa
n	0,56	0,43
C	0,0101	0,0476
$\dot{\epsilon}_0$	1	1000

Współpraca zbrojenia z betonem

Zagadnienie przyczepności zbrojenia i betonu w konstrukcjach żelbetowych jest bardzo ważne. Siły przyczepności występujące pomiędzy zbrojeniem a betonem mają charakter adhezyjny. Występuje również tarcie na powierzchni styku. Właściwości powierzchni współpracy zależą od rodzaju prętów (gładkie czy żebrowane), długości zakotwienia i klasy betonu. Na rysunku 6.12 przedstawiono schematycznie rozkład sił w przecię zbrojenia zakotwionym w betonie.



Rys. 6.12. Rozkład sił w zakotwionym w betonie przecię zbrojenia; l_b – długość zakotwienia, ϕ – średnica pręta, $f_{y,d}$ – obliczeniowa granica plastyczności stali, $f_{b,d}$ – siły przyczepności betonu (zależne od klasy betonu i rodzaju prętów)

W symulacjach komputerowych wykorzystuje się różne metody modelowania zbrojenia do matrycy betonowej. W pierwszej metodzie zbrojenie jest rozmyte, definiowane za pomocą elementów powłokowych lub membranowych. W drugiej metodzie zbrojenie definiuje się jako dyskretne w postaci elementów belkowych lub kratowych. Możliwe jest wtedy obserwowanie pojedynczego pręta, czy ulega zerwaniu (rozciąganie) lub wyboczeniu (ściskanie). W przypadku konstrukcji obciążonych wybuchem zwykle uwzględnia się pełną współpracę między betonem a zbrojeniem.

Literatura

Abrams A. (1917), Effect of rate application of load on the compressive strength of concrete, *Proc. Amer. Soc. Testing Materials*, (17), s. 364–377.

- Bischoff P., Perry S. (1991), Compressive behaviour of concrete at high strain rate, *Materials and Structures*, (24), s. 425–450.
- Brara A., Camborde F., Klepaczko J., Mariotti C. (2001), Experimental and numerical study of concrete at high strain rates in tension, *Mechanics of Materials*, 1 (33), s. 33–45.
- Brara A., Klepaczko J. (2006), Experimental characterization of concrete in dynamic tension, *Mechanics of Materials*, (38), s. 253–267.
- Campbell J. (1953), The dynamic yielding of mild steel, *Acta Metallurgica*, (1), s. 706–710.
- Cundall P.A., Strack O.D.L. (1979), A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, (29), s. 47–65.
- Freund L. (1993), *Dynamic fracture mechanics*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Geers M., Borst R.D., Peerlings R. (2000), Damage and crack modeling in single-edge and double-edge notched concrete beams, *Engineering Fracture Mechanics*, (65), s. 247–261.
- Jankowiak T., Łodygowski T. (2005), Identification of parameters of concrete damage plasticity constitutive model, *Foundations of Civil and Environmental Engineering*, (6), s. 53–69.
- Jankowiak T., Klepaczko J., Łodygowski T. (2006), Numerical modeling of wave propagation and interaction in bars, *Foundations of Civil and Environmental Engineering*, (7), s. 187–199.
- Jankowiak T., Łodygowski T. (2010), Quasi-static failure criteria for concrete, *Archives of Civil Engineering*, (56) 2, s. 123–154.
- Jankowiak T. (2011), *Kryteria zniszczenia betonu poddanego obciążeniom quasi-statycznym i dynamicznym*, Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.
- Jankowiak T., Rusinek A., Łodygowski T. (2011), Validation of the Klepaczko-Malinowski model for friction correction and recommendations on Split Hopkinson Pressure Bar, *Finite Elements in Analysis and Design*, 47, s. 1191–1208.
- Klepaczko J., Brara A. (2001), An experimental method for dynamic tensile testing of concrete by spalling, *International Journal of Impact Engineering*, (25), s. 387–409.
- Kupfer H., Hilsdo H., Rusch H. (1969), Behavior of concrete under biaxial stresses, *ACI Materials Journal*, (66), s. 656–666.
- Litoński J. (1977), Plastic flow of a tube under adiabatic torsion, *Biuletyn Polskiej Akademii Nauk*, 1 (25), s. 1–8.
- LS-Dyna Theory Manual (2010), compiled by John O. Hallquist.
- Neville A. M. (1996), *Properties of concrete: fourth and final edition*, New Jersey, Wiley.

- Oluokun F. (1991), Prediction of concrete tensile strength from compressive strength: evaluation of existing relations for normal weight concrete, *ACI Materials Journal*, (3), s. 302–309.
- Ross C., Tedesco J., Kuenen S. (1992), Effects of strain rate on concrete strength, *ACI Materials Journal*, (1), s. 37–47.
- Raphael J. (1984), Tensile strength of concrete, *ACI Materials Journal*, (2), s. 158–165.
- Rusinek A. (2000), *Modelisation thermoviscoplastique d'une nuance de tole d'acier aux grandes vitesses de deformation. Etude experimentale et numerique du cisaillement, de la traction et de la perforation Metz*. Ph.D. thesis, University of Metz, France.
- Stolarski A. (2004), Dynamic strength criterion for concrete, *Journal of engineering mechanics*, 130 (12), s. 1428–1435.
- Swaddiwudhiponga S., Hai-Rong Lub L., Wee T.H. (2003), Direct tension test and tensile strain capacity of concrete at early age, *Cement and Concrete Research*, (33), s. 2077–2084.
- Tuler F., Butcher B. (1968), A criterion for the time dependence of dynamic fracture, *International Journal of Fracture Mechacnics*, (4), s. 431–437.
- Users Manual for Ls-Dyna concrete material model 159 (2007), public. number FHWA-HRT-05-062, U.S. Department of Transportation.
- Zienkiewicz O., Taylor R. (2005), *The Finite Element Method*, Ed. 6, London, Elsevier Butterworth Heinemann.

7. Przykłady komputerowej analizy procesu zniszczenia elementów konstrukcyjnych

7.1. Uwagi wstępne

W wyniku eksplozji materiału wybuchowego w krótkim czasie powstaje duża ilość gazu, co powoduje gwałtowny wzrost ciśnienia i propagację fali w powietrzu. Zjawiska te są tak intensywne, że prowadzą do uszkodzenia, a nawet całkowitego zniszczenia konstrukcji. Zagrożenie dla ludzi stwarza nie tylko katastrofa konstrukcji budowlanej, ale także propagacja fali, a przede wszystkim rażenie wszelakiego rodzaju odłamkami. Podejmując działania mające na celu zwiększenie bezpieczeństwa, należy minimalizować prawdopodobieństwo, a także skutki zarówno zniszczenia konstrukcji, jak i innych groźnych dla ludzi zjawisk związanych z wybuchem. Do oceny skutków wybuchu można wykorzystać metody mechaniki komputerowej.

Komputerowa analiza konstrukcji w warunkach zagrożenia terrorystycznego i numeryczne symulacje odpowiedzi konstrukcji na wybuch wymagają zdecydowanie innego podejścia niż analiza konstrukcji poddanych klasycznym oddziaływaniom obciążeń zmiennych (w tym wiatru i śniegu) i wyjątkowych, np. typu sejsmicznego.

Analiza i minimalizacja groźnych skutków wybuchu zawsze musi się rozpocząć od przyjęcia pewnych scenariuszy wybuchu. Przede wszystkim chodzi tu o miejsce przyłożenia i siłę ładunku wybuchowego. Rozważając prawdopodobne scenariusze, bierze się pod uwagę łatwość umieszczenia ładunku i planowaną przez zamachowca maksymalizację skutków wybuchu.

Współczesna wiedza z zakresu mechaniki komputerowej i nowoczesny sprzęt komputerowy pozwalają wykonywać symulacje procesu wybuchu i jego skutków, począwszy od wzrostu ciśnienia i rozchodzenia się fali powstałej w powietrzu, przez symulację oddziaływania na napotkane obiekty, w tym na elementy konstrukcyjne, rozwoju uszkodzeń tych elementów i wreszcie symulację ewentualnej katastrofy. Wyznaczanie czasowego rozkładu ciśnienia oddziałującego na elementy konstrukcji lub architektury oraz dostępne programy komputerowe do modelowania tego rozkładu zostały omówione w rozdziale 5. W przedstawionych niżej przykładach wykorzystano niektóre z tych programów, by zademonstrować ich skuteczność i przeprowadzić analizę parametryczną zależności obciążenia elementu konstrukcyjnego od wielkości materiału wybuchowego, jego odległości od elementu konstrukcyjnego, kąta natarcia fali itp. W normach dotyczących projektowania konstrukcji ciśnienie to jest zaliczane do obciążeń wyjątkowych. Znając rozkład w przestrzeni i czasie ciśnienia oddziałującego na element konstrukcji, można przeprowadzić komputerową symulację tzw. odpowiedzi konstrukcji. Jak już podkreślono, symulacja taka znacznie się różni od typowej analizy statycznej lub dynamicznej przeprowadzonej przez

projektantów konstrukcji. Ponieważ analizowane zjawiska rozwijają się bardzo szybko, prędkości odkształceń są bardzo duże. Obowiązują wtedy inne związki fizyczne między odkształceniami i naprężeniami. Co więcej, nie wystarczy wybrać odpowiednią formę związku fizycznego. Należy wprowadzić tam odpowiednie wartości parametrów, by symulacja była prawdziwa. Podstawowe wiadomości dotyczące związków fizycznych uwzględniających duże prędkości odkształceń zostały przedstawione w rozdziale 6 dla podstawowych materiałów stosowanych w budownictwie. Omówiono tam związki konstytutywne obowiązujące zarówno w zagadnieniach statycznych (w tym quasi-statycznych), klasycznych problemach dynamicznych z małą prędkością odkształceń (wpływ prędkości odkształceń pomijalny), jak i przy dużych prędkościach odkształceń. Przedstawiono tam także kryteria zniszczenia materiałów, które należy wprowadzić do modelu materiału przy małej i przy dużej prędkości odkształceń. W niniejszym rozdziale wykorzystano związki konstytutywne i kryteria zniszczenia materiału uwzględniające duże prędkości odkształceń.

W klasycznej dynamice zwykle poszukuje się odpowiedzi konstrukcji w dziedzinie czasu lub częstotliwości. Ten drugi sposób jest często stosowany w badaniach eksperymentalnych. Analizowane tutaj zjawiska należą do niestacjonarnych, silnie nieliniowych procesów dynamicznych, więc należy rejestrować eksperymentalnie bądź symulować komputerowo odpowiedź konstrukcji jako zmienny w czasie proces. W symulacjach komputerowych równania dynamiki całkuje się krok po kroku czasowym. Najczęściej stosuje się jawną metodę całkowania równań ruchu. Taka metoda jest tylko warunkowo stabilna. Niezwykle ważne jest przyjęcie właściwego kroku czasowego, który zapewni stabilność i odpowiednią dokładność rozwiązania. Krok czasowy zależy także od wielkości przyjętych elementów skończonych. Zbyt duży krok czasowy powoduje błędy obliczeń, a zbyt mały nadmierną czasochłonność, a także błędy numeryczne innego typu. Dobór wielkości kroku czasowego jest więc ważną decyzją. Aby zapewnić możliwość obserwacji fali w obrębie elementu skończonego, zwykle zakłada się na tyle mały krok całkowania, by fala pokonała w nim nie więcej niż połowę wymiaru elementu skończonego. Podłużna fala mechaniczna, zwana falą akustyczną, w jednorodnym ośrodku sprężystym ma prędkość:

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (7.1)$$

gdzie: ρ – masa właściwa,

K – objętościowy moduł sprężystości (ang. *bulk modulus*).

Moduł K określa względną zmianę objętości elementu $dV = dx dy dz$ w wyniku trójosiowego rozciągania pod wpływem naprężenia p , to znaczy

$$\frac{\Delta dV}{dV} = \frac{p}{K} \quad (7.2)$$

Z prawa Hooke'ego dla trójosiowego rozciągania wynika, że

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (7.3)$$

gdzie: E – moduł sprężystości przy jednoosiowym rozciąganiu (moduł Younga),
 ν – współczynnik Poissona.

Więcej informacji o stabilności algorytmów całkowania równań ruchu można znaleźć w literaturze [Crisfield 1997].

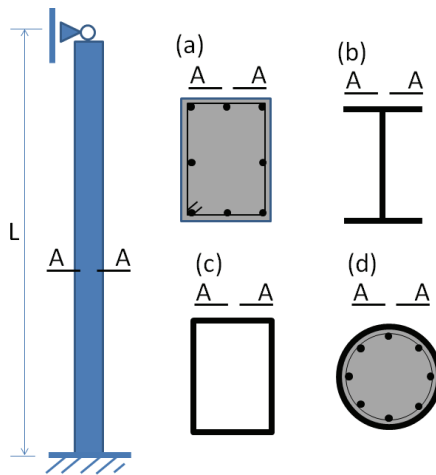
Metoda elementów skończonych wymaga wybrania typu elementu i siatki dyskretyzacji konstrukcji. Wszystkie zjawiska lokalne związane z wybuchem, a więc zlokalizowane uszkodzenie materiału i zjawiska zachodzące w połączeniach elementów konstrukcyjnych, wymagają stosowania elementów 3D. W elementach konstrukcyjnych oddalonych od miejsca wybuchu można ewentualnie stosować elementy 1D (do słupów i belek) oraz 2D (do płyt i tarcz).

Poniżej przedstawiono przykłady analizy elementów konstrukcyjnych poddanych wpływowi wybuchu materiału umieszczonego w ich pobliżu. W przykładach tych zastosowano wszystkie omówione wyżej zasady modelowania komputerowego.

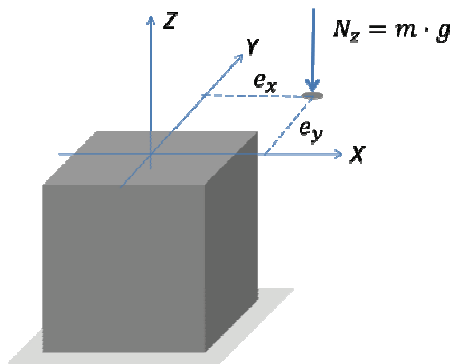
7.2. Ocena wytrzymałości słupów żelbetowych, stalowych i zespolonych

Do komputerowej analizy procesu zniszczenia krytycznych elementów konstrukcyjnych wybrano cztery rodzaje słupów, często stosowanych w budownictwie przemysłowym (rys. 7.1). Słupy zaprojektowano zgodnie z obowiązującymi normami konstrukcyjnymi.

We wszystkich przypadkach przyjęto obciążenie głowicy słupa w postaci siły skupionej oraz dwóch momentów w celu wytworzenia układu ściskanego z jednoczesnym zginaniem dwukierunkowym. W celu uwzględnienia bezwładności konstrukcji obciążonej dynamicznie siłą skupioną i momenty zastąpiono ekwiwalentną masą (rys. 7.2) przyłożoną w punkcie referencyjnym na mimośródach: $e_x = M_y/N_z$ oraz $e_y = M_x/N_z$. Wszystkie podpory modelowano bez uwzględnienia podatności połączeń.



Rys. 7.1. Schemat statyczny słupa oraz przekroje poprzeczne: (a) słupa żelbetowego o przekroju prostokątnym, (b) słupa stalowego o przekroju dwuteowym, (c) słupa stalowego o przekroju prostokątnym, (d) słupa kompozytowego o przekroju kołowym z płaszczem stalowym i rdzeniem żelbetowym

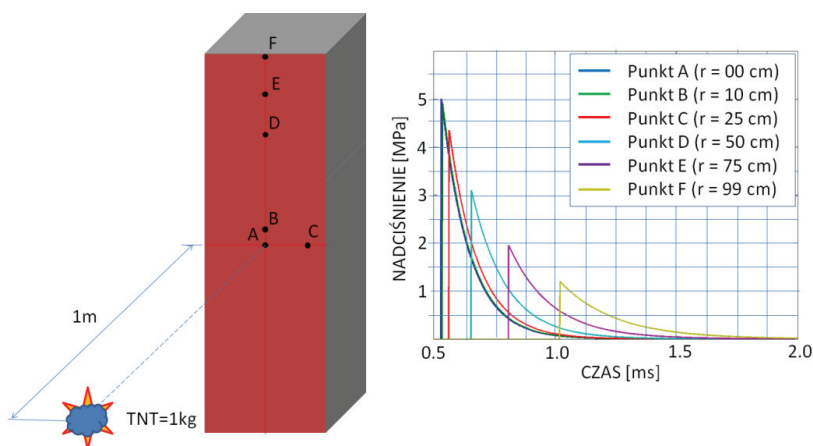


Rys. 7.2. Schemat przyłożenia obciążenia: m – masa, g – przyspieszenie ziemskie (pozostałe symbole opisano w tekście)

Analiza konstrukcji obciążonej eksplozją jest trudnym zagadnieniem inżynierskim z uwagi na jej silnie nieliniowe zachowanie, zarówno w przestrzeni odkształceń, jak i przemieszczeń. Do tak skomplikowanych obliczeń inżynierskich należy wykorzystywać bardziej zaawansowane narzędzia. Programy oparte na metodzie elementów skończonych (Abaqus, Ansys, LS-Dyna itp.) doskonale nadają się do symulowania konstrukcji poddanej niestandardowym obciążeniom oraz w przypadku, gdy opis sprężysty materiału jest niewystarczający. Zaawansowane programy MES do analizy procesów dynamicznych

mają często wbudowane narzędzia do analizy rozkładu ciśnień powstałych wskutek eksplozji.

Jednym z ciekawszych narzędzi przeznaczonych do analizy rozkładu ciśnienia w czasie i przestrzeni jest ConWep. Jest to program stworzony przez rząd Stanów Zjednoczonych. Jedynymi danymi, które należy do niego wprowadzić, są wielkość ładunku i jego położenie (lokalizacja w odniesieniu do analizowanej konstrukcji). Po ich wprowadzeniu otrzymuje się ciśnienie w każdym punkcie analizowanej konstrukcji z uwzględnieniem kątów padania fali uderzeniowej (rys. 7.3). Wielkość ładunku, którą należy wprowadzić, to równoważnik trotylowy wybuchu. Jest to umowna wartość przyporządkowana różnym materiałom wybuchowym, pozwalająca oszacować ich siłę, równoważną energii wydzielonej podczas wybuchu danej masy trotylu (TNT). Program ConWep umożliwia dość precyzyjne odtworzenie przebiegu wybuchu. Na rysunku 7.3 pokazano typowy rozkład ciśnienia, zmienny w czasie i przestrzeni, na powierzchni obciążonego wybuchem słupa, uzyskany za pomocą ConWep.



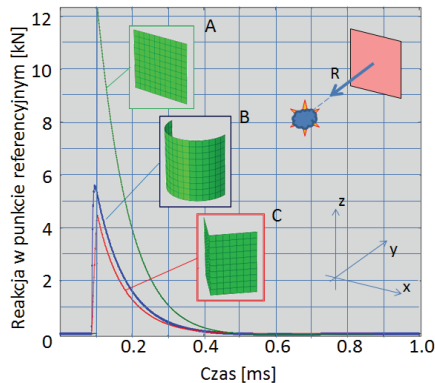
Rys. 7.3. Zmienny w czasie i przestrzeni rozkład naciśnienia na powierzchni słupa

Na rysunku 7.4 pokazano zależność reakcji wypadkowej przekroju od kształtu powierzchni obciążonej wybuchem (reakcja jest wyliczona jako całka ciśnienia działającego na powierzchni 1 cm^2 , zrzuwanego na kierunek \mathbf{t} działania fali uderzeniowej). Wartość reakcji wypadkowej można wyrazić wzorem:

$$R_t = \sum_{i=1}^N P_i \mathbf{n}_i \mathbf{t} \quad (7.4)$$

gdzie: P_i – ciśnienie działające na jednostkową powierzchnię opisaną wektorem normalnym \mathbf{n}_i ,
 \mathbf{t} – kierunek działania fali uderzeniowej.

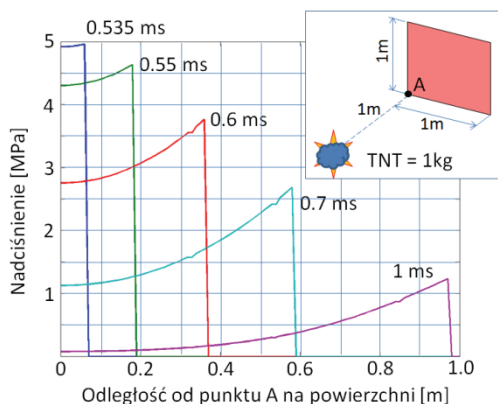
Reakcja wyliczona na powierzchni B i C jest ponad dwukrotnie mniejsza od reakcji na powierzchni A. Ta dość oczywista obserwacja potwierdza fakt, że kształt elementu obciążonego wybuchem odgrywa ważną rolę w minimalizacji skutków eksplozji.



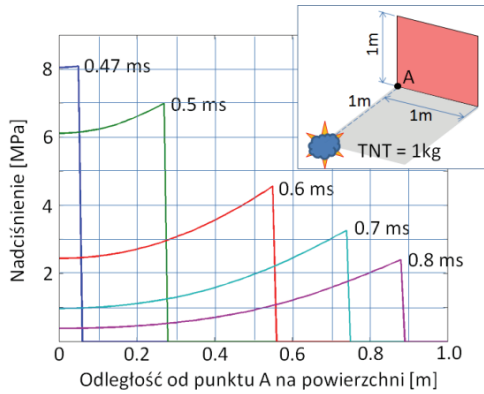
Rys. 7.4. Masa ładunku TNT = 0,01 kg, odległość od powierzchni 0,05 m

Na rysunkach 7.5 i 7.6 pokazano typowe rozkłady ciśnienia wyliczone za pomocą programu ConWep w dwóch przypadkach: (a) wybuchu nieograniczonego (ang. *airblast*) oraz (b) wybuchu, w którym uwzględniono odbicie fali uderzeniowej (ang. *surfaceblast*).

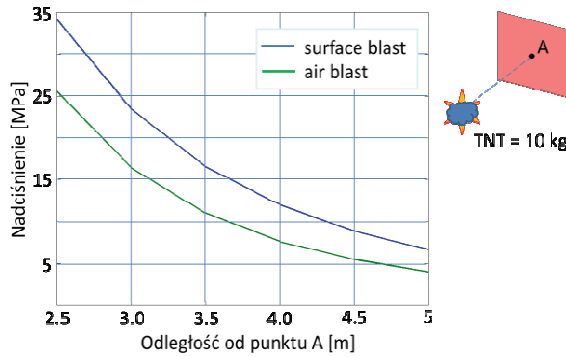
Na rysunkach 7.7 oraz 7.8 pokazano maksymalne ciśnienie w punkcie A w zależności od wielkości ładunku i odległości od miejsca wybuchu. Widać, że zależność wartości nadciśnienia do masy ładunku i odległości od miejsca eksplozji jest silnie nieliniowa. Nieznaczne zredukowanie masy ładunku lub zwiększenie jego odległości od badanej powierzchni powoduje znaczne zmniejszenie wartości oddziałującego ciśnienia.



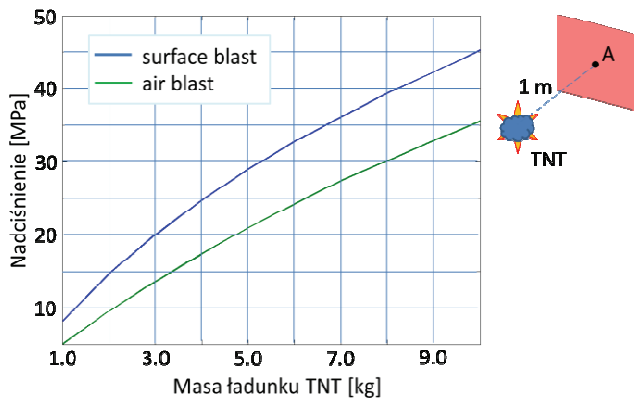
Rys. 7.5. Zmienny w czasie i przestrzeni rozkład ciśnienia na powierzchni (ConWep: Air blast)



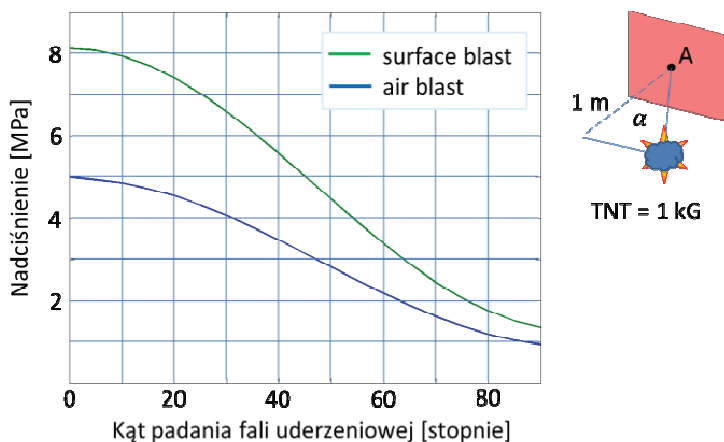
Rys. 7.6. Zmienny w czasie i przestrzeni rozkład ciśnienia na powierzchni (ConWep: Surface blast)



Rys. 7.7. Zmiana maksymalnej wartości nadciśnienia w punkcie A w zależności od odległości wybuchu od powierzchni; masa ładunku TNT = 10 kg



Rys. 7.8. Zmiana maksymalnej wartości nadciśnienia w punkcie A w zależności od masy ładunku TNT; odległość ładunku od powierzchni 1 m



Rys. 7.9. Zmiana maksymalnej wartości nadciśnienia w punkcie A w zależności od kąta padania fali uderzeniowej na powierzchnię przy ładunku TNT 1 kg i odległości 1 m

Na rysunku 7.9 pokazano zależność maksymalnego ciśnienia w punkcie A od kąta padania fali uderzeniowej. Z wykresu wynika, że kąt padania fali uderzeniowej na powierzchnię jest istotnym elementem analizy wpływu wybuchu na konstrukcję. Im większy kąt padania, tym ciśnienie działające na powierzchnię elementu jest mniejsze.

Analiza wytrzymałościowa

W celu porównania odporności na wybuch czterech różnych słupów zaprojektowano je, przyjmując takie same dane projektowe i materiałowe (zabrane w tab. 7.1–7.3). Pozwoliło to na obiektywną ocenę wytrzymałości elementów oryginalnie nieprojektowanych na obciążenia eksplozją.

Tab. 7.1. Dane projektowe

Parametr	Wartość
Geometria wysokość słupa	6
Parametry linowego modelu Druckera-Pragera siła osiowa	1500
moment względem osi	240
moment względem osi	150

Tab. 7.2. Parametry betonu

Parametr	Wartość
Gęstość ρ [kg/m ³]	2400
Parametry sprężyste moduł Younga E [GPa] współczynnik Poissona ν	30 0,2
Parametry linowego modelu Druckera-Pragera kąt tarcia wewnętrznego ϕ [deg] współczynnik stosunku naprężeń K kąt dylatacji ψ [deg] granica plastyczności przy rozciąganiu [MPa]	65 0,8 45 3
Parametry wpływu prędkości odkształceń parametr D [1/s] wykładnik n	40 5
Parametry zniszczenia odkształcenie niszczące ε_f prędkość odkształceń $\dot{\varepsilon}$ [1/s] przesunięcie, przy którym następuje zniszczenie u_f [m]	0,01–0,001 0,0001–10000 0,001

Aby rzetelnie ocenić, czy dany element ulegnie zniszczeniu przy konkretnej ilości TNT, należy znaleźć mierzalne wielkości, które pozwolą dokonać obiektywnej oceny. Takimi wielkościami są:

- przemieszczenie pionowe głowicy słupa, mierzone w środku ciężkości przekroju,
- całkowita energia kinetyczna układu,
- całkowita energia wewnętrzna układu.

Słup ulegający zniszczeniu znacznie się przemieszcza i odkształca, co powoduje permanentne zwiększanie prędkości, z którą ściśle jest powiązana energia kinetyczna. W konstrukcji, która wytrzymała uderzenie, przemieszczenie stabilizuje się na pewnym poziomie, a energia kinetyczna wyraźnie maleje. Dodatkowo, na podstawie energii zniszczenia można określić, jaka część energii całkowitej spowodowała destrukcję materiału.

Tab. 7.3. Parametry stali

Parametr	Wartość
1	2
Gęstość ρ [kg/m ³]	7860
Parametry sprężyste moduł Younga E [GPa] współczynnik Poissona ν	210 0,3

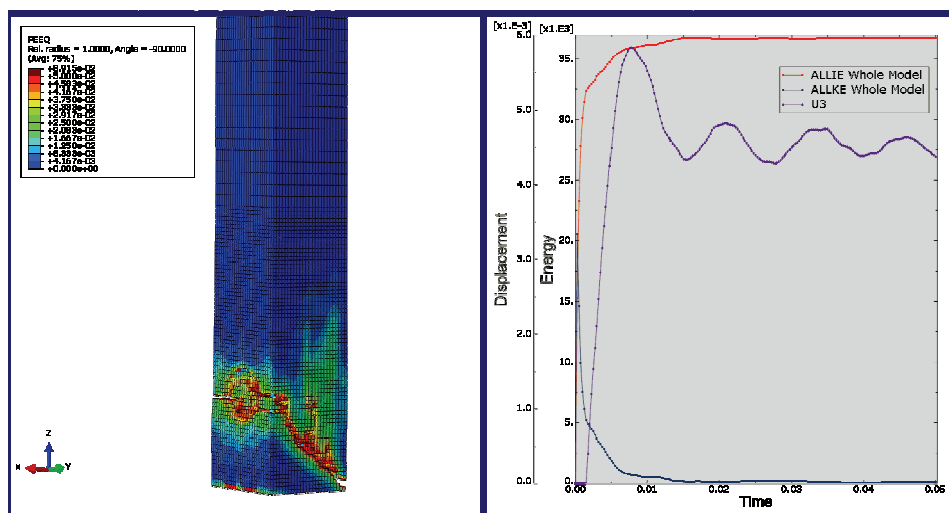
Tab. 5.1 cd.

1	2
Parametry modelu Hubera-Misesa granica plastyczności σ_{pl} [MPa] wzmocnienie σ_H [MPa]	500 200
Parametry wpływu prędkości odkształceń parametr D [1/s] wykładnik n	40 5
Parametry zniszczenia odkształcenie niszczące ε_f prędkość odkształceń $\dot{\varepsilon}$ [1/s] przemieszczenie, przy którym następuje zniszczenie u_f [m]	0,1–0,01 0,001–10000 0,01

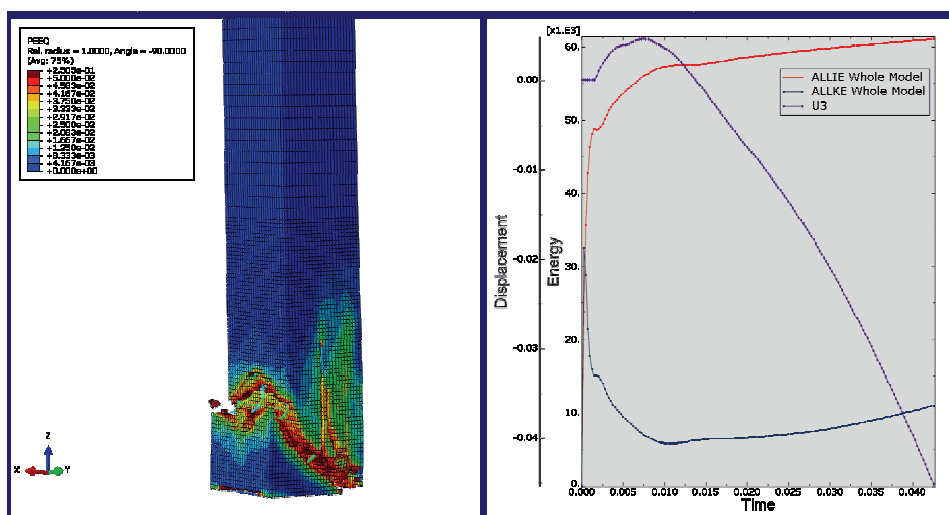
Zniszczenie konstrukcji oceniono więc na podstawie trzech podanych wyżej parametrów w czasie kilkudziesięciu milisekund od wybuchu oraz dodatkowo na podstawie analizy wzrokowej. Wyniki symulacji pokazane na rys. 7.10–7.18 można interpretować w następujący sposób: (a) stały wzrost energii kinetycznej lub wewnętrznej układu oznacza, że słup uległ zniszczeniu; (b) spadek energii kinetycznej wraz ze stabilizacją energii wewnętrznej jest sygnałem, że element uległ drobnym zniszczeniom, ale nadal przenosi obciążenia statyczne; (c) gwałtowne przemieszczenie pionowe (na wykresach krzywa opadająca w dół) oznacza utratę nośności przez element (duże przemieszczenia są zazwyczaj sprzężone z dużymi wzrostami energii kinetycznej); (d) oscylacyjne przemieszczenia pionowe głowicy oznaczają, że element zachował nośność.

Słup żelbetowy

Słup zaprojektowano zgodnie z normą PN-B-03264:1999 i obciążono dodatkowo ciśnieniem powstałym na skutek detonacji ładunku wybuchowego zlokalizowanego na wysokości 0,5 m od podstawy słupa i w odległości 0,5 m od jego osi. Stopniowo zwiększając wartość masy ładunku, określono graniczną wartość TNT, która powoduje zniszczenie elementu. Na rysunku 7.10 pokazano słup żelbetowy, który nie uległ zniszczeniu (nadal przenosi siły statyczne), a na rys. 7.11 element, który został zniszczony. W drugim przypadku z powodu całkowitego zniszczenia krytycznego elementu konstrukcyjnego może nastąpić zniszczenie innych elementów konstrukcyjnych, co może doprowadzić do katastrofy.



Rys. 7.10. Słup żelbetowy obciążony ładunkiem TNT = 4 kg w odległości 0,5 m

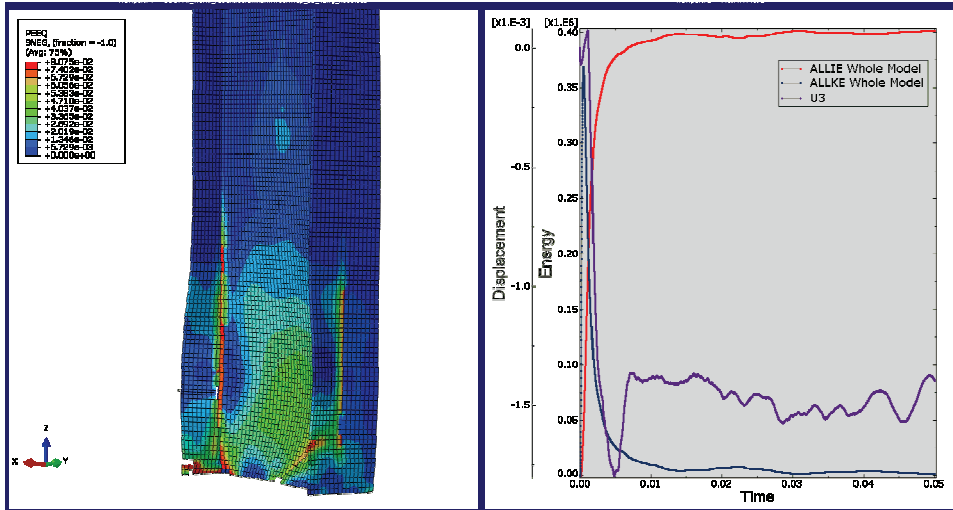


Rys. 7.11. Słup żelbetowy obciążony ładunkiem TNT = 5 kg w odległości 0,5 m

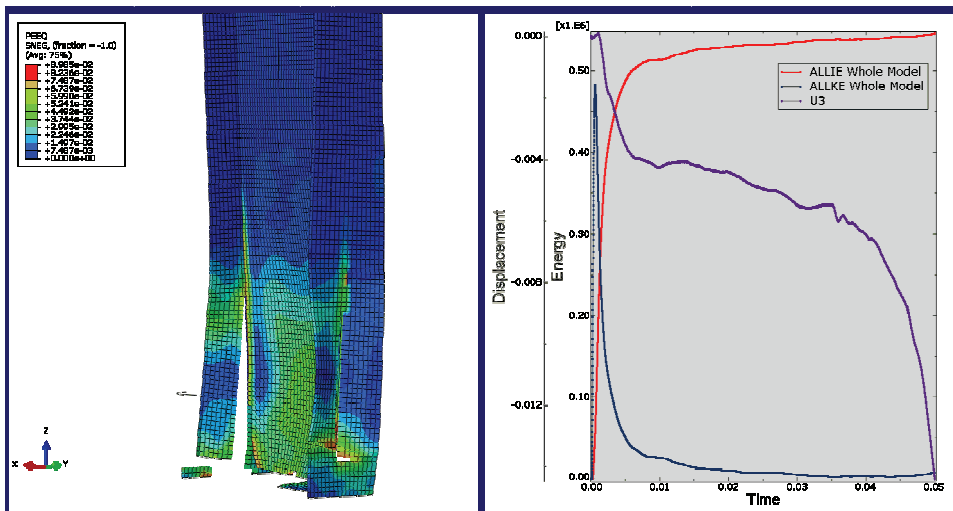
Słupy stalowe

Zgodnie z obowiązującą normą zaprojektowano dwa słupy stalowe: blachownicowy o przekroju dwuteowym oraz o przekroju rurowym prostokątnym. Słupy obciążono wybuchem o różnej sile. Na podstawie przemieszczeń głowicy oraz wykresów energii kinetycznej i energii zniszczenia ustalono, przy jakiej

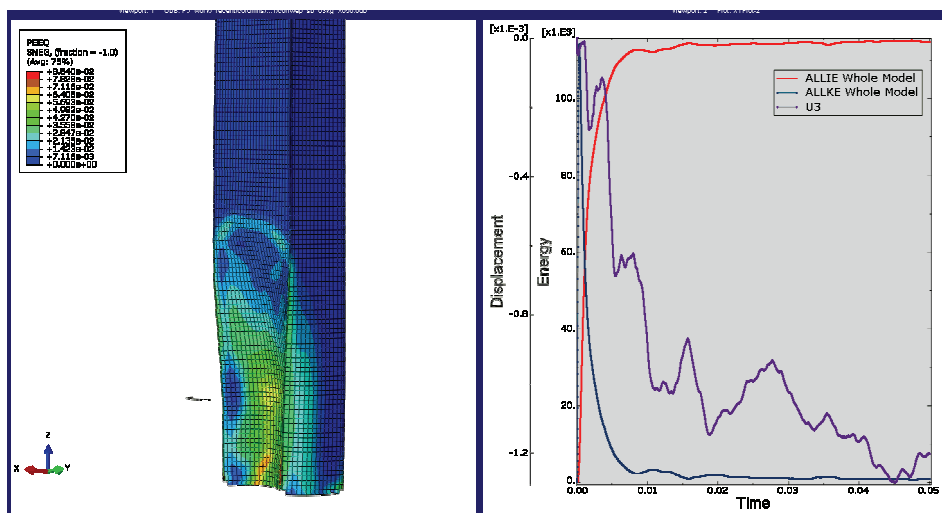
masie ładunku wybuchowego słup ulegnie zniszczeniu. Na rysunkach 7.12 i 7.14 pokazano słupy, które nie uległy zniszczeniu, a na rys. 7.13 i 7.15 zniszczone elementy.



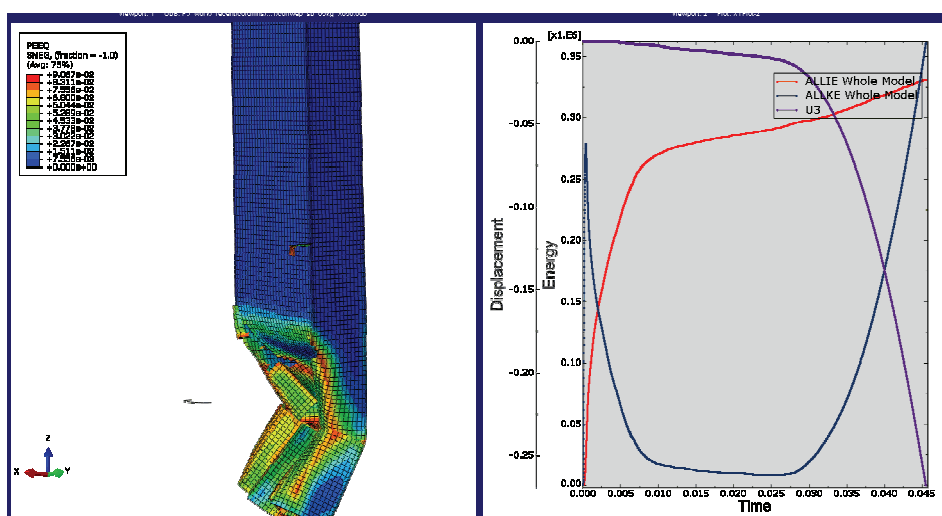
Rys. 7.12. Słup stalowy o przekroju dwuteowym obciążony ładunkiem TNT = 12 kg w odległości 0,5 m



Rys. 7.13. Słup stalowy o przekroju dwuteowym obciążony ładunkiem TNT = 14 kg w odległości 0,5 m



Rys. 7.14. Słup stalowy o przekroju rurowym prostokątnym obciążony ładunkiem TNT = 3 kg w odległości 0,5 m



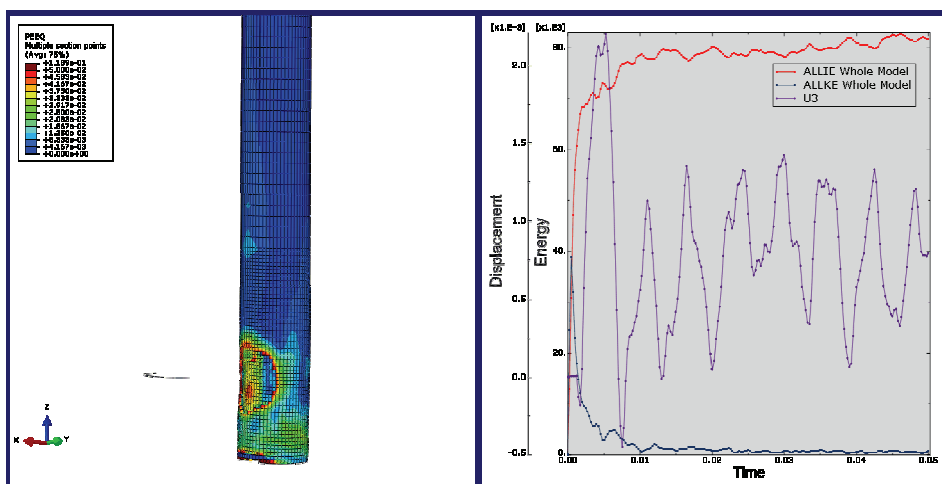
Rys. 7.15. Słup stalowy o przekroju rurowym prostokątnym obciążony ładunkiem TNT = 5 kg w odległości 0,5 m

Słup zespolone

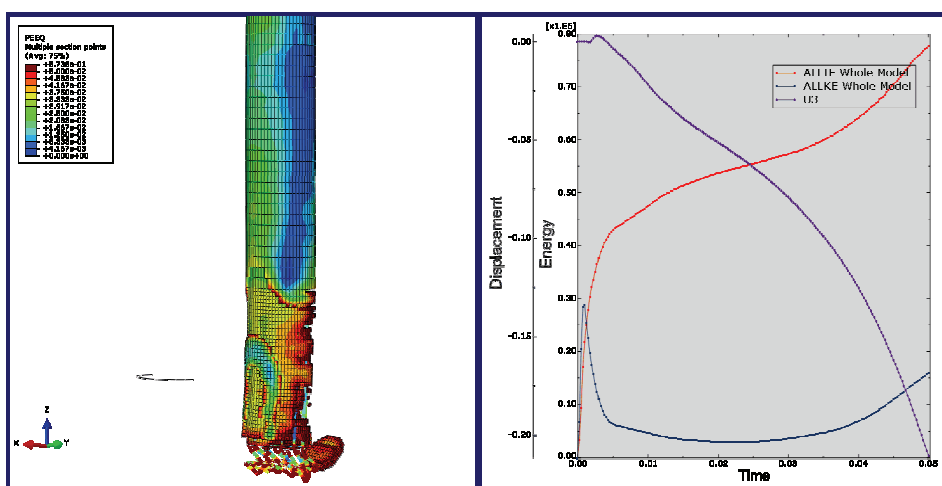
Elementy kompozytowe zaprojektowane zgodnie z normą EN 1994-1-1:2004 obciążono eksplozją. Na podstawie analizy wybranych wartości przemieszczenia głowicy słupa oraz energii kinetycznej i zniszczenia określono, przy jakiej masie ładunku wybuchowego, umieszczonego na wysokości 0,5 m od podstawy słupa

w odległości 0,5 m od jego osi, słup ulegnie zniszczeniu. Na rysunku 7.16 pokazano słup kompozytowy (bez rury zewnętrznej), który nie uległ zniszczeniu pod wpływem wybuchu, a na rys. 7.17 słup, który został zniszczony.

Masy ładunków niszczących słupy zespolone są znacznie większe niż masy ładunków, które powodowały zniszczenie słupów żelbetowych i stalowych. Jest to ważny argument przemawiający za tym, aby krytyczne elementy konstrukcyjne wykonywać z elementów zespolonych. Warto również zwrócić uwagę, że elementy o przekroju okrągłym mają lepsze właściwości aerodynamiczne, dzięki czemu wartość reakcji wypadkowej przekroju jest mniejsza (zobacz rys. 7.4).

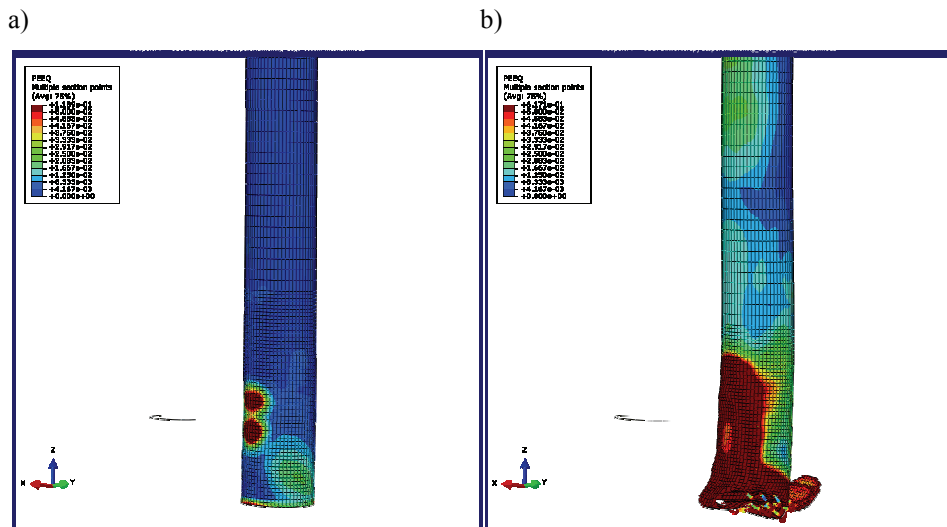


Rys. 7.16. Słup zespolony okrągły obciążony ładunkiem TNT = 27 kg w odległości 0,5 m od osi słupa



Rys. 7.17. Słup zespolony okrągły obciążony ładunkiem TNT = 30 kg w odległości 0,5 m

Na rysunku 7.18 pokazano oba słupy. Na rysunku 7.18b widać, że wskutek zniszczenia żelbetowego rdzenia rura stalowa zaczyna się deformować, przez co słup ulega zniszczeniu.



Rys. 7.18. Słup zespolony stalowo-żelbetowy: a) niezniszczony, b) zniszczony

7.3. Ocena bezpieczeństwa wewnątrz wielokondygnacyjnego budynku biurowego

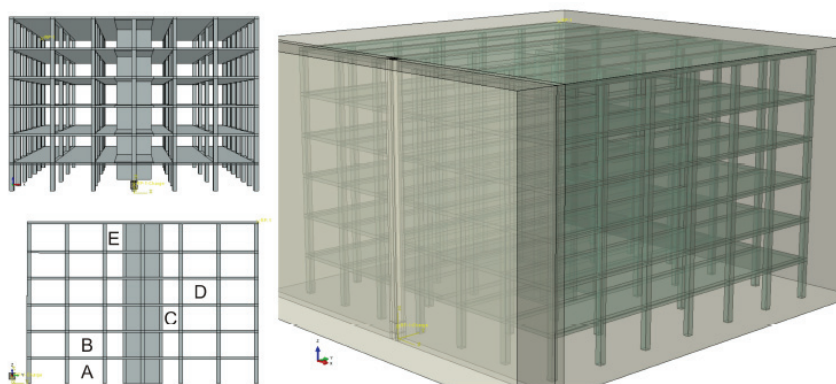
Autorzy wykonali wiele obliczeń i analiz komputerowych, które stanowiły wsparcie procesu projektowego, w szczególności w zakresie bezpieczeństwa konstrukcji. W kolejnych podrozdziałach przedstawiono fragmenty tych obliczeń, mogące być przydatne dla projektantów. Podane przykłady dotyczą zarówno analiz konstrukcji budynków, jak i bezpieczeństwa ludzi narażonych na bezpośrednie działanie fali uderzeniowej.

Numeryczne przykłady podzielono na dwie klasy: związane ze zniszczeniem konstrukcji oraz z możliwością zastosowania różnych wzmocnień. Dodatkowo przedstawiono przykłady analizy propagacji ciśnienia wybuchu z uwzględnieniem odbicia od sztywnych elementów budynku.

Pierwszy przykład jest związany z oceną bezpieczeństwa ludzi przebywających w wielokondygnacyjnym budynku biurowym o konstrukcji słupowo-płytowej w momencie detonacji materiału wybuchowego bezpośrednio przy zewnętrznej elewacji obiektu. Budynek składa się z sześciu kondygnacji naziemnych, podzielonych stropem żelbetowym grubości 30 cm. Powierzchnia każdego piętra to około 500 m². Kolejne kondygnacje są podparte 48 jednako-

wymi słupami o przekroju $30 \times 30 \text{ cm}^2$ oraz szybem windowym (dwie windy) ustawionym centralnie wewnątrz budynku (rys. 7.19).

Analizowano dwa warianty zagrożeń opisanej konstrukcji: eksplozję 100 kg materiału wybuchowego w odległości 1 m od elewacji zewnętrznej oraz 1000 kg w odległości 2 m tuż nad powierzchnią terenu. Aby propagacja ciśnienia przez



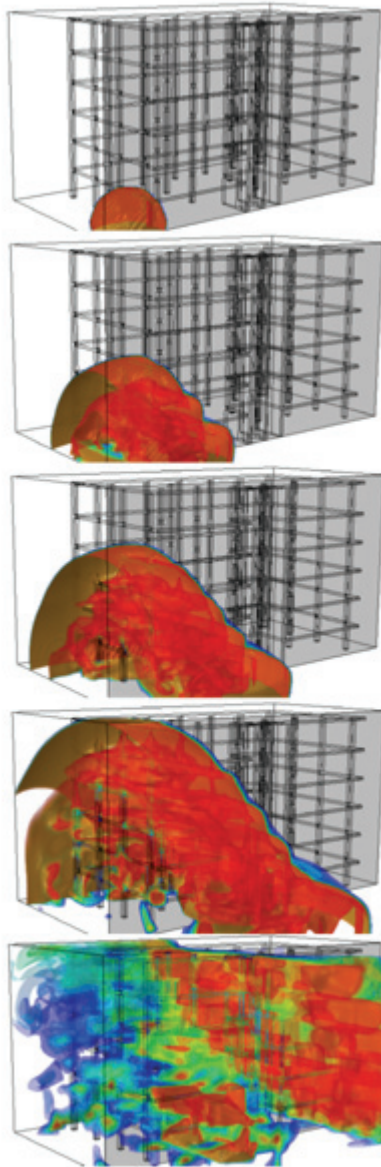
Rys. 7.19. Schemat konstrukcji wielokondygnacyjnego budynku biurowego

poszczególne piętra budynku była wiarygodna, posłużono się eulerowskimi modelami przepływowymi, falę uderzeniową opisano równaniami stanu [Sielicki 2013]. Przedstawiona na rys. 7.19b prostopadłościenna przestrzeń odzwierciedla powietrze znajdujące w bezpośrednim sąsiedztwie budynku. W trakcie analizy nie brano pod uwagę istnienia elewacji szklanej, ponieważ założono jej całkowite zniszczenie w chwili wybuchu, gdyż jest nieodporna na tego rodzaju obciążenia impulsowe. W rzeczywistości odłamki (głównie szklane) powodują największe obrażenia przebywających wewnątrz budynku ludzi. Strefy bezpieczeństwa oceniono wyłącznie na podstawie analizy skrajnych wartości ciśnienia i czasu ich występowania w poszczególnych strefach wszystkich pięter budynku.

Wyniki przedstawiono w postaci trójwymiarowych map ciśnienia (rys. 7.20), które w znacznym stopniu ułatwiły ocenę bezpieczeństwa na poszczególnych kondygnacjach. Wskazane na rys. 7.19 punkty charakterystyczne A–E były w rzeczywistości punktami, w których analizowano wpływ zasadniczych parametrów na jakość wyników. Do takich parametrów zaliczono m.in. energetyczność detonowanego ładunku wybuchowego, wpływ odbicia fali uderzeniowej od powierzchni podłoża i elementów konstrukcyjnych, stopień skomplikowania zadania, tzn. dyskretyzacji przestrzeni, w której rozchodzi się fala ciśnienia.

Wyznaczenie średniego obciążenia ciśnieniem wybranych elementów konstrukcji umożliwiło ocenę zagrożenia tych elementów, a później określenie ce-

lowości wykonania wzmocnienia. W związku z tym z wykorzystaniem przedstawionych wyników analizowano kolejno słupy, ściany i stropy, aby uzyskać ich rzeczywistą postać zniszczenia, a w konsekwencji zniszczenia fragmentu lub całej konstrukcji budynku.

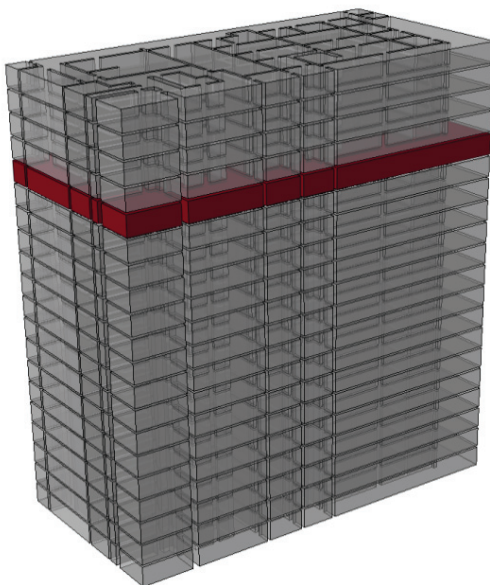


Rys. 7.20. Propagacja ciśnienia w wyniku eksplozji materiału wybuchowego

7.4. Analiza propagacji ciśnienia w kondygnacji budynku podziemnego. Wyznaczenie stref bezpieczeństwa

Podobny do omówionego poprzednio jest przykład oceny stref bezpieczeństwa w podziemnej konstrukcji budynku. Schemat konstrukcji pokazano na rys. 7.21. Zaznaczone kolorem piętro to kondygnacja, na której istnieje realne zagrożenie eksplozją, gdyż w jednym z pomieszczeń może wystąpić mieszanina gazowo-powietrzna.

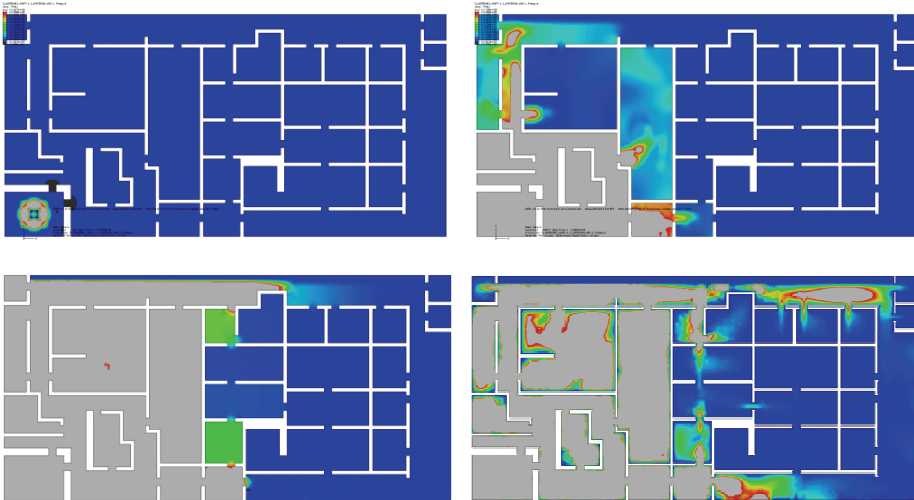
Z uwagi na umiejscowienie całej struktury pod ziemią i brak okien w zewnętrznych ścianach kondygnacji fala ciśnienia nie może wyjść poza konstrukcję. Jej propagacja następuje wyłącznie wewnątrz budynku i stopniowo wygasa.



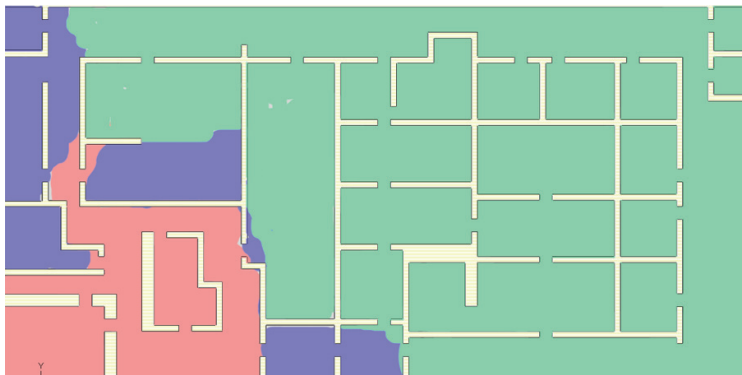
Rys. 7.21. Schemat konstrukcji wielokondygnacyjnego budynku podziemnego

Ze względu na rozmiar zadania przeanalizowano tutaj tylko jedną kondygnację. W wyniku detonacji mieszaniny gazowo-powietrznej powstaje front fali ciśnienia, który stopniowo przechodzi przez korytarze i pomieszczenia. W celu określenia stopnia bezpieczeństwa wybranych pomieszczeń uśredniono panujące wewnątrz ciśnienie w funkcji czasu jego trwania. We wstępnej analizie przyjęto najniekorzystniejszy wariant – pominięto istnienie drzwi wewnętrznych. W następnych analizach przyjmowano, że drzwi wewnętrzne mają podwyższoną wytrzymałość na obciążenie dynamiczne oraz specjalnie zaprojektowane nadproża drzwiowe. Propagację ciśnienia w kolejnych chwilach czasowych przedstawiono

na rys. 7.22. Kolorem szarym oznaczono wartość ciśnienia i zagrożenie ludzi, wyznaczone metodą przedstawioną w pracy Sielickiego [2013].



Rys. 7.22. Propagacja ciśnienia wewnątrz kondygnacji podziemnej w funkcji czasu



Rys. 7.23. Strefy bezpieczeństwa: kolor czerwony – śmiertelność 100%

Na podstawie map ewolucji ciśnienia wyznaczono trzy strefy bezpieczeństwa z uwzględnieniem jakości drzwi i kanałów, przez które fala ciśnienia jest wyprowadzana ponad powierzchnię terenu. Przykładowo wyznaczono strefy bezpieczeństwa pokazane na rys. 7.23, gdzie kolorem czerwonym zaznaczono strefę, w której prawdopodobieństwo śmiertelności personelu w wyniku incydenalnego zdarzenia wynosi 1:1, kolorem niebieskim 1:2 oraz odpowiednio kolorem zielonym 1:10.

7.5. Wzmocniona ściana murowana

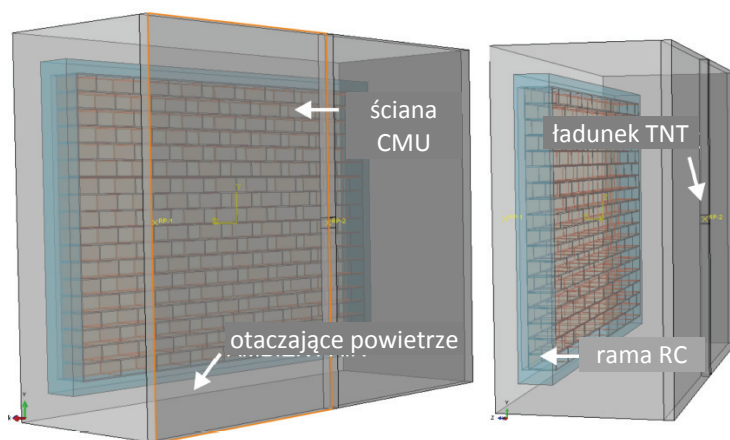
Oprócz klasycznych konstrukcji żelbetowych i stalowych często stosuje się elementy murowane. Są to najczęściej jednowarstwowe ściany murowane, wypełniające pionowe przegrody rozpięte pomiędzy stropami budynków. Analizowano ścianę murowaną bez otworów drzwiowych i okiennych (rys. 7.24) długości 3,5 m i wysokości 2,5 m. Konstrukcję wzniesiono z pełnych bloczków betonowych na zaprawie cementowej o stałej grubości 15 mm.



Rys. 7.24. Rodzaje ścian murowanych stosowanych jako wypełnienie konstrukcji [Sielicki 2013]

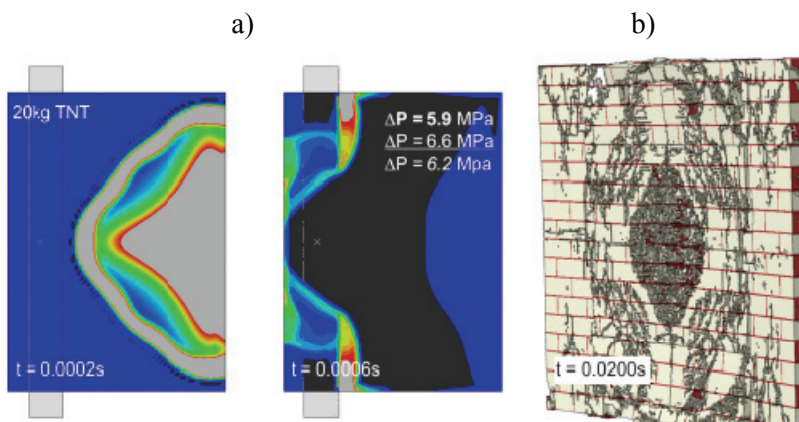
Założono, że ściana znajduje się na pierwszej kondygnacji naziemnej i jest obciążona 2 kg ładunku wybuchowego umieszczonego 1 m nad powierzchnią terenu w odległości 1,5 m. Podobnie jak w przypadku budynku wielokondygnacyjnego, w komputerowym modelu ściany przyjęto, że jest ona otoczona powietrzem (rys. 7.25). Założono, że konstrukcja jest zamocowana w sztywnej ramie wyłącznie za pomocą zaprawy. Przyjęto model zniszczenia ściany i osobny dla zaprawy oparty na pracy Sielickiego [2013], z uwzględnieniem wpływu prędkości odkształcenia. Obliczono graniczne wartości odległości i masy ładunku dla bezpieczeństwa przeszkody.

Na podstawie badań i eksperymentów zaproponowano system wzmocnienia ściany za pomocą przekrojów stalowych i tkaniny wysokiej wytrzymałości przymocowanej do wewnętrznej strony ściany. Istotnie zwiększyło to wytrzymałość konstrukcji obciążonej ładunkiem zlokalizowanym w takiej samej odległości jak w przypadku ściany bez wzmocnienia. Wybrane etapy zniszczenia ściany murowanej w wyniku działania fali uderzeniowej przedstawiono na rys. 7.26.

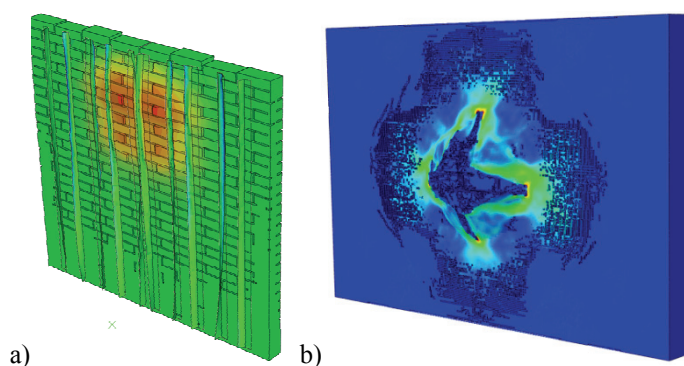


Rys. 7.25. Niezbrojona ściana murowana otoczona powietrzem

Zadaniem wzmocnienia konstrukcji jest spięcie ściany od wewnętrznej strony budynku i przejście naprężenia rozciągającego powstałego w wyniku wstępnego wyboczenia ściany wskutek wybuchu. W klasycznej konstrukcji żelbetowej można to uzyskać za pomocą odpowiedniej konstrukcji zbrojenia. W analizowanym przykładzie materiał przyklejony do całej powierzchni ściany pełnił również dodatkową funkcję – ograniczał zasięg poruszających się ze znaczną prędkością odłamków, by nie dosięgnęły nastęnej przeszkody i nie zagrażały przebywającym w budynku ludziom.



Rys. 7.26. Zniszczenie niezbrojonej ściany murowanej [Sielicki 2013]: a) fala uderzeniowa poruszająca się od prawej do lewej strony, b) schemat zniszczenia ściany po 20 ms



Rys. 7.27. Wzmocnienie ściany murowanej: a) pręty stalowe, b) tkanina z tworzyw sztucznych

Tego rodzaju wzmocnienie jest zalecane w obiektach, w których zagrożenie eksplozją określa się jako duże.

7.6. Podsumowanie

Przedstawione wyżej przykłady pokazują, że można wykonać komputerowe symulacje bardzo złożonych procesów związanych z wybuchem. Wyniki symulacji są zgodne z eksperymentami opisanymi w literaturze i własnymi prowadzonymi na poligonie wojskowym, w których badano odporność wybranych elementów konstrukcyjnych na wybuch umieszczonego w pobliżu trotylu.

Wyniki symulacji opisanych w podrozdziałach 7.2–7.5 mogą być bezpośrednio wykorzystane przez projektantów budynków. Między innymi pokazują one zależność siły destrukcyjnej ładunku od jego wielkości i odległości od elementu konstrukcyjnego. Powiększając tę odległość, można zdecydowanie zwiększyć bezpieczeństwo konstrukcji. Przykładem, jak łatwo można to osiągnąć, jest odsunięcie słupów nośnych od ściany zewnętrznej. Mocując ścianę zewnętrzną do wsporników rygli stropowych zamiast bezpośrednio do słupów, można znacznie zwiększyć bezpieczeństwo słupów, gdyż znajdują się one w większej odległości od ściany zewnętrznej, a co za tym idzie – od ładunku umieszczonego na zewnątrz budynku.

Pewnego wyjaśnienia wymaga kwestia warunków brzegowych, jakie należy przyjąć podczas komputerowego modelowania dynamicznej odpowiedzi słupa na impulsowe działanie wybuchu. Wiadomo, że wynik analizy drgań konstrukcji istotnie zależy od założonych warunków brzegowych. Jeśli jednak jesteśmy zainteresowani tylko skutkami lokalnego zniszczenia słupa, wywołanego przez wybuch ładunku umieszczonego w jego pobliżu, to warunki brzegowe na odległych końcach słupa nie mają decydującego znaczenia, gdyż przy krótkotrwałym impulsie obciążenia główną reakcją stanowią siły bezwładności słupa. W innych przypadkach odpowiednie dobranie warunków brzegowych ma podstawowe

znaczenie, a jest to szczególnie ważne wtedy, gdy analizujemy słup wydzielony z konstrukcji. Warunki brzegowe odgrywają wtedy podwójną rolę: muszą zapewnić prawidłowe modelowanie procesu dynamicznego zachodzącego w słupie i rozwoju sił kontaktowych w miejscu połączenia słupa z konstrukcją na nim opartą. Zmienne w czasie siły kontaktowe można wykorzystać do analizy zachowania konstrukcji po zniszczeniu słupa. Taki był cel analizy przedstawionych przykładów. Dlatego słup obciążono wstępnie siłą ściskającą i momentem. Co więcej, aby model komputerowy odpowiadał rzeczywistości, przyjęto, że siła obciążająca słup jest skupioną masą, zamocowaną na mimośrodku do górnego końca słupa. Warunek brzegowy nie tylko poprawnie odzwierciedla obciążenie siłą i momentem, ale modeluje także pewną bezwładność obciążenia w chwili gwałtownego zniszczenia słupa. Takie warunki brzegowe pozwalają śledzić końcową fazę zniszczenia słupa oraz ewolucję sił i przemieszczeń w miejscu połączenia ze stropem. Wielkości te mogą być wykorzystane do analizy całej konstrukcji po zniszczeniu słupa. Dalszym uogólnieniem warunków brzegowych na górnym końcu słupa może być przyjęcie tam modelu reologicznego, który przy odpowiednio dobranych parametrach może dobrze opisywać wzajemne oddziaływanie słupa i konstrukcji na nim spoczywającej.

Symulacje numeryczne opisane w podrozdziałach 7.2–7.5 dotyczą słupów, ścian i stropów jako elementów wydzielonych z całej konstrukcji budynku. Mogą być wykorzystane do projektowania pewnych elementów konstrukcji, tak by były one bardziej odporne na obciążenie falą spowodowaną wybuchem. Przykłady pokazują też, kiedy nastąpi zniszczenie tych elementów i jaki ma ono przebieg. Wyniki tych analiz mogą być także wykorzystane w dalszej ocenie niebezpieczeństwa zniszczenia całej konstrukcji budynku.

Należy podkreślić zasadnicze różnice między celem i zasadami projektowania konstrukcji do eksploatacji w warunkach normalnych a celem i zasadami projektowania konstrukcji w przewidywanych warunkach wybuchu. W pierwszym przypadku, dobrze znanym projektantom, konstrukcję projektuje się tak, by nie dopuścić do przekroczenia stanów granicznych nośności i użyteczności. W czasie wieloletniej eksploatacji musi ona zapewniać bezpieczeństwo wyrażone odpowiednimi wskaźnikami niezawodności i zapewniać komfort użytkowania. Nie jest to możliwe w sytuacji ataku terrorystycznego. Wtedy dopuszcza się poważne uszkodzenie konstrukcji. Sukcesem jest, gdy konstrukcja przetrwa obciążenie wybuchem, mimo że będzie wymagała poważnego remontu. Dopuszcza się nawet zniszczenie pewnych części budynku. Celem stawianym przy projektowaniu konstrukcji w warunkach zagrożenia terrorystycznego jest zminimalizowanie skutków wybuchu, a przede wszystkim zmniejszenie zakresu tzw. postępującego zniszczenia (ang. *progressive failure*), gdy zniszczenie pewnych elementów konstrukcyjnych pociąga za sobą zniszczenie kolejnych elementów, co w konsekwencji może doprowadzić do postępującej katastrofy (ang. *progressive collapse*). Znane są tragiczne przykłady postępującej katastrofy, np. World Trade Centre w 2001 roku. Znane są też przykłady odwrotne.

W Gdańsku w kwietniu 1995 roku w piwnicy wieżowca wykonanego w technologii wielkiej płyty nastąpił potężny wybuch gazu, który całkowicie zniszczył trzy najniższe kondygnacje. Zginęły 22 osoby, ale budynek osiadł i osiem górnych kondygnacji się zachowało. Przy całkowitym zniszczeniu budynku liczba ofiar byłaby wielokrotnie większa.

Po tragicznej serii aktów terrorystycznych podjęto intensywne badania nad metodami zwiększenia bezpieczeństwa budowli. Efektem tego są liczne publikacje i zalecenia projektowe, omówione w rozdziałach 4–6.

W normach amerykańskich [Department of Defense 2003; General Services Administration 2000] podane są zalecenia odnośnie do modelowania procesu postępującej katastrofy i graniczne dopuszczalne rozmiary częściowej katastrofy budynku. Jak wspomniano w podrozdziale 7.1, trzeba przewidzieć różne scenariusze zagrożenia. Oprócz takich sytuacji jak np. wybuch gazu w normie [General Services Administration 2000] zaleca się rozpatrzenie przypadków, gdy w kondygnacji przyziemia zostanie zniszczony słup nośny: narożnikowy lub usytuowany w środku ściany szczytowej, lub usytuowany w środku podłużnej ściany zewnętrznej, albo słup wewnętrzny. Podobnie należy rozpatrzyć przypadki zniszczenia fragmentu ścian nośnych w podobnych miejscach budynku. Analizuje się zachowanie budynku przy nagłym, niezależnym od siebie usunięciu wymienionych elementów wsporczych. Dopuszcza się zniszczenie ograniczone do:

- pola stropu bezpośrednio spoczywającego na zniszczonym elemencie (słup, ściana),
- pola 1800 stóp kwadratowych, tzn. 167 m^2 , stropu bezpośrednio opartego na zniszczonym elemencie.

Należy przyjąć to z wyżej wymienionych dwóch kryteriów, które określa mniejsze zniszczenie stropu. Aby wykazać, że budowla może ulec tak ograniczonej katastrofie, w modelowaniu postępującej katastrofy trzeba uwzględnić wszystkie rezerwy nośności konstrukcji. W normie [Department of Defence 2003] dopuszcza się mniej rygorystyczne współczynniki obciążeń niż przy zwykłym projektowaniu. Natomiast w normie [General Services Administration 2000] zalecono uwzględnienie możliwości plastycznej pracy materiału i powstawania nowych schematów konstrukcyjnych, np. układów typu ciągnowego lub przesklepienia łukowego. Rzecz w tym, by już na etapie projektowania konstrukcji przewidzieć możliwość powstania takich schematów i wyzwolenia nietypowych rezerw nośności. Ze względu na złożoność modelowania postępującego zniszczenia i postępującej katastrofy trzeba stosować wiele założeń upraszczających. Jednym z nich jest traktowanie konstrukcji jako ramy płaskiej, choć w rzeczywistości jest to rama przestrzenna. Takie podejście przyjęli Kim i inni [2009] oraz udostępnili opracowany przez siebie system komputerowy do analizy zniszczenia postępującego. Pracę o podstawowym znaczeniu przedstawił Kwaśniewski [2010]. Modelował on postępującą katastrofę stalowego budynku szkielekowego (w rzucie $18 \text{ m} \times 45 \text{ m}$) ze stropami zespolonymi (podstawowe

i drugorzędne żebra stalowe z wewnętrzną płytą żelbetową). Analizował całą konstrukcję jako układ 3D, stosując różne typy elementów skończonych i praw konstytutywnych w obszarach koncentracji naprężeń i zniszczenia. Praca ta dowodzi, że możliwe jest wiarygodne modelowanie postępującej katastrofy.

Rozwiązane w podrozdziale 7.2 zadania symulowania wybuchu i reakcji elementów konstrukcyjnych pokazują, że komputerowe modelowanie tych zjawisk może być wykorzystywane do projektowania nowych konstrukcji o podwyższonych wymaganiach bezpieczeństwa i do projektowania osłon konstrukcji już istniejących. Jednak rozmiar zadania i czas analizy komputerowej niewspółmiernie wzrastają, jeśli zamiast jednego elementu konstrukcyjnego modeluje się całą konstrukcję, włącznie z symulacją przebiegu katastrofy spowodowanej wybuchem. Trzeba zatem wiedzy, doświadczenia i wysiłku, by zbudować model w rozsądnym rozmiarze i zadowalającej dokładności. Wymaga to zastosowania komputerów o bardzo dużej mocy, a zalecane jest także zastosowanie przetwarzania równoległego.

Wiarygodne informacje o bezpieczeństwie konstrukcji w warunkach zagrożenia terrorystycznego można uzyskać, stosując podejście uproszczone, polegające na dekompozycji zadania. Oddzielnie analizuje się wybrane elementy konstrukcyjne podczas wybuchu. Następnie symuluje się zachowanie konstrukcji po nagłym usunięciu jednego słupa lub fragmentu ściany nośnej. Wyznaczona w przykładach ewolucja sił i przemieszczeń w miejscu kontaktu głowicy słupa ze stropem pozwala na dokładniejszą analizę niż nagłe usunięcie słupa.

Literatura

- Crisfield M.A. (1997), *Non-linear finite element analysis of solids and structures*, vol. 1 i 2, Wiley.
- Department of Defense (2003), *Unified facilities criteria. Minimum antiterrorism standards for buildings* (UFC 4-010-01), U.S. Army Corps of Engineering.
- General Services Administration (2000), *Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects*, Washington (DC), Office of Chief Architect.
- Kim H.S., Kim J., An D.W. (2009), Development of integrated system for progressive collapse analysis of building structures considering dynamic effects, *Adv. Eng. Software*, 40, s. 1–8.
- Kwaśniewski L. (2010), Nonlinear dynamic simulations of progressive collapse for a multi story building, *Engineering Structures*, 32, s. 1223–1235.
- Łodygowski T., Sielicki P.W. (2010), Estimation of building safety under explosion, w: *Trwałość i skuteczność napraw obiektów budowlanych*, Rydzyna.
- Sielicki P.W. (2013), *Masonry failure under unusual impulse loading*, Poznan, Poznan University of Technology.

Posłowie

W podręczniku podjęto temat bezpieczeństwa budowli i ludzi w warunkach zagrożenia terrorystycznego. Uwagę skupiono na wybuchu ładunku skoncentrowanego i objętościowego (wybuch gazu). W pierwszej części omówiono ogólne zasady projektowania i eksploatacji obiektów budowlanych zapewniające możliwie największe bezpieczeństwo. Przedstawiono rozwiązania urbanistyczne i architektoniczne oraz metody ułatwiające kontrolę dostępu do chronionego obiektu i pozwalające minimalizować skutki wybuchu.

W drugiej części przeanalizowano stan prawny, zarządzenia, normy oraz wytyczne projektowania i eksploatacji obiektów z uwzględnieniem ich bezpieczeństwa w warunkach zagrożenia terrorystycznego. Analizą objęto liczny zbiór dokumentów krajowych, europejskich i wydanych w Stanach Zjednoczonych Ameryki. Przedstawione wyniki analizy, w tym związane informacje o treści i dostępności tych materiałów, mogą stanowić dla czytelnika wskazówkę odnośnie do możliwości ich wykorzystania. Co więcej, z analizy tej wynika, że stan przepisów prawnych i norm zarówno w Polsce, jak i w Europie jest niezadowolający.

W trzeciej części podjęto problematykę komputerowej analizy i symulacji oddziaływania wybuchu na budowlę. Komputerowa analiza konstrukcji poddanej wybuchowi zasadniczo różni się od tradycyjnej analizy konstrukcji, którą dobrze znają projektanci. W podręczniku jasno przedstawiono istotne różnice. Sformułowano wiele wskazówek, jak można i należy tworzyć komputerowy model konstrukcji poddanej wybuchowi. Wykazano, że możliwe jest modelowanie oraz komputerowe symulowanie zachowania konstrukcji poddanej wybuchowi. Trzeba pamiętać, że symulacje komputerowe są wielokrotnie tańsze i szybsze niż eksperymentalne badanie odporności budowli na wybuch. Modele komputerowe stworzone przez autorów i zastosowane w analizach konstrukcji zostały zweryfikowane w ramach rzeczywistych eksperymentów pirotechnicznych przeprowadzonych na poligonie wojskowym. Eksperymenty potwierdziły prawidłowość opracowanych modeli. Niniejsza książka może stanowić zachętę i być pomocna dla osób podejmujących tę tematykę.

Jednym z podstawowych wyników prezentowanych badań jest wniosek o niezadowolającym stanie krajowych i europejskich aktów prawnych i norm w zakresie bezpieczeństwa budowli i ludzi w warunkach zagrożenia terrorystycznego. Istnieją podstawy do przewidywania wzrostu tego zagrożenia. Dlatego pilne i ważne jest podjęcie prac nad takimi dokumentami. W pracach tych główną rolę muszą odgrywać organa państwowe odpowiedzialne za bezpieczeństwo. Nie może w nich jednak zabraknąć inżynierów i naukowców specjalizujących się w badaniach konstrukcji poddanych wybuchowi.

