NAUKA
DLA OBRONNOŚCI

Bezpieczeństwo Infrastruktury Krytycznej

TOM 1

pod redakcją: **MICHAŁA CIAŁKOWSKIEGO**
TOMASZA ŁODYGOWSKIEGO
ANDRZEJA ŻYLUKA

WYDAWNICTWO INSTYTUTU TECHNICZNEGO WOJSK LOTNICZYCH

WARSZAWA 2022

RECENZENCI
gen. dyw. (rez.) dr hab. inż. pil. Leszek CWOJDZIŃSKI
gen. dyw. dr inż. Dariusz ŁUKOWSKI
płk. dr inż. Wojciech PROKOPOWICZ
prof. dr hab. inż. Andrzej FRĄCKOWIAK
dr hab. inż. Agnieszka WRÓBLEWSKA, prof. PP
dr n. med. Przemysław DAROSZEWSKI
dr inż. Łukasz BRODZIK
dr inż. Łukasz GIERZ
dr inż. Przemysław GRZYMISŁAWSKI
dr inż. Radosław JANKOWSKI
dr inż. Robert KŁOSOWIAK
dr inż. Łukasz SEMKŁO

KOMITET REDAKCYJNY
Michał CIAŁKOWSKI – przewodniczący
Tomasz ŁODYGOWSKI
Andrzej ŻYLUK

PRZYGOTOWANIE DO DRUKU
Łukasz SEMKŁO

PROJEKT OKŁADKI
Tomasz GROCHOWSKI

Fot. na okładce: Mika Baumeister, Antonin Duallia, Lance Asper - unsplash.com

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

© Copyright by Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, wyd. I, 2022 r.

ISBN 978-83-61021-38-4 (oprawa miękka)
ISBN 978-83-61021-39-1 (PDF)

WYDAWNICTWO INSTYTUTU TECHNICZNEGO WOJSK LOTNICZYCH
01-494 Warszawa 46, ul. Księcia Bolesława 6
Drukowano w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych

KOMITET STERUJĄCY

prof. Tomasz ŁODYGOWSKI
***Przewodniczący**, Politechnika Poznańska*
prof. Michał CIAŁKOWSKI
Politechnika Poznańska

KOMITET HONOROWY

prof. Abdelhakim ARTIBA
President of Université Polytechnique Hauts-de-France
nadbryg. Andrzej BARTKOWIAK
Komendant Główny Państwowej Straży Pożarnej
prof. Philippe DUBOIS
Rector of University of Mons
prof. Gesine GRANDE
President of Brandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg
Jacek JAŚKOWIAK
Prezydent miasta Poznania
prof. Mirosław KOWALSKI
Dyrektor Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych
dr Jari KUUSISTO
Rector of University of Vaasa
nadinsp. Piotr MĄKA
Komendant Wojewódzki Policji w Poznaniu
prof. Ángel PAZOS
Rector of University of Cantabria
prof. Francesco PRIOLO
Rector of University of Catania
Leszek WALCZAK
Wojskowe Zakłady Lotnicze nr 2 w Bydgoszczy
Marek WOŹNIAK
Marszałek Województwa Wielkopolskiego
prof. Mykhailo ZGUROVSKY
Rektor Politechniki Kijowskiej
Michał ZIELIŃSKI
Wojewoda Wielkopolski

KOMITET NAUKOWY

prof. Teofil JESIONOWSKI,
***Przewodniczący**, Rektor Politechniki Poznańskiej*
gen. bryg. pil. dr Krzysztof CUR
Rektor-komendant Lotniczej Akademii Wojskowej
dr Przemysław DAROSZEWSKI
Dyrektor Szpitala Ortopedyczno-Rehabilitacyjnego im. W. Degi UM w Poznaniu
gen. bryg. Jan DZIEDZIC

nadbryg. prof. Mariusz FELTYNOWSKI
Rektor-Komendant Szkoły Głównej Służby Pożarniczej
prof. Andrzej FRĄCKOWIAK
Politechnika Poznańska
prof. Marek IDZIOR
Politechnika Poznańska
prof. Stanisław KACHEL
Wojskowa Akademia Techniczna
prof. Zbigniew KORUBA
Rektor Politechniki Świętokrzyskiej
gen. bryg. dr Robert KOSOWSKI
Rektor-Komendant Akademii Sztuki Wojennej
prof. Piotr KOSZELNIK
*Re*ktor *Politechniki Rzeszowskiej*
prof. Jerzy LIS
Rektor Akademii Górniczo-Hutniczej
gen. dyw. Dariusz ŁUKOWSKI
Biuro Bezpieczeństwa Narodowego
prof. Arkadiusz MĘŻYK
Rektor Politechniki Śląskiej
gen. broni pil. dr Tadeusz MIKUTEL
I Zastępca Szefa Sztabu Generalnego
prof. Zbigniew NADOLNY
Politechnika Poznańska
gen. bryg. pil. Ireneusz NOWAK
zastępca Inspektora Sił Powietrznych
prof. Aleksander OLEJNIK
Wojskowa Akademia Techniczna
prof. Piotr SIELICKI
Politechnika Poznańska
gen. bryg. prof. Dariusz SKORUPKA
rektor senior Akademii Wojsk Lądowych
kontradmirał prof. Tomasz SZUBRYCHT
Rektor-Komendant Akademii Marynarki Wojennej
prof. Franciszek TOMASZEWSKI
Politechnika Poznańska
płk prof. Przemysław WACHULAK
Rektor-Komendant Wojskowej Akademii Technicznej
prof. kpt. ż. w. Adam WEINTRIT
Rektor Uniwersytetu Morskiego w Gdyni
Elżbieta WAWRZYNKIEWICZ
Wojskowe Zakłady Motoryzacyjne
prof. Krzysztof WILDE
Rektor Politechniki Gdańskiej

prof. Arkadiusz WÓJS
Rektor Politechniki Wrocławskiej
prof. Krzysztof ZAREMBA
Rektor Politechniki Warszawskiej
prof. Andrzej ŻYLUK
Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

KOMITET ORGANIZACYJNY

prof. Michał CIAŁKOWSKI
Przewodniczący
prof. Agnieszka WRÓBLEWSKA
V-ce przewodnicząca
mgr Paulina SIELICKA
Sekretarz
gen. dyw. pil. dr Leszek CWOJDZIŃSKI
płk dr Wojciech PROKOPOWICZ
ppłk dr Mariusz WESOŁOWSKI
dr Łukasz SEMKŁO
mgr Natalia LEWANDOWSKA
mgr Aleksandra ROSIŃSKA

SŁOWO WSTĘPNE

Infrastruktura krytyczna obejmuje podstawowe elementy mające znaczenie dla utrzymania niezbędnych funkcji społecznych, a więc zdrowia i bezpieczeństwa obywateli oraz dobrobytu materialnego, kulturowego i społecznego ludności państwa. Infrastruktura krytyczna zawiera w sobie systemy i zasoby fizyczne lub wirtualne, których naruszenie miałoby wpływ na bezpieczeństwo w skali lokalnej lub globalnej. Zabezpieczenie tych struktur na okoliczność sytuacji nadzwyczajnych musi być troską odpowiednich służb dozorujących wybrane elementy na poziomie lokalnym oraz globalnym całego państwa.

Budowa Systemu Ochrony Infrastruktury stanowi płaszczyznę do integracji działań zmierzających do polepszenia odporności infrastruktury krytycznej, jak również jej strategicznych zasobów.

Celem konferencji jest przedstawienie różnych aspektów (prawnych, technicznych, administracyjnych, osobowych) ochrony infrastruktury krytycznej. Ważnym efektem konferencji będzie wymiana doświadczeń pomiędzy osobami i jednostkami odpowiedzialnymi za ochronę infrastruktury krytycznej, co przyczyni się do jej usprawnienia i unowocześnienia.

Spotkanie to umożliwi merytoryczną dyskusję, która pozwoli dokonać przeglądu istniejących rozwiązań i procedur oraz wypracować opinie na temat potrzeb i działań, na jakie powinniśmy już dziś być przygotowani. Liczymy na to, że prezentacje ekspertów oraz dyskusje przyczynią się do lepszego rozumienia złożoności problemów ochrony infrastruktury i poprawienia wszelkich procedur służących jej bezpieczeństwu na okoliczność sytuacji nadzwyczajnych.

Tomasz Łodygowski
Michał Ciałkowski

SPIS TREŚCI

Maciej ADAMCZYK, Adam KOZAKIEWICZ, Maciej MAJCHER
Kierunki rozwoju układów wlotowych w samolotach bojowych 1

Hasan AL-RIFAIE, Piotr WOŹNIAK, Tomasz ŁODYGOWSKI
Improving the blast resistance of steel columns using trapezoidal sandwich panels 33

Łukasz BRODZIK
Analiza samolotów myśliwskich na podstawie wybranych parametrów 55

Łukasz BRODZIK
Zastosowanie teorii cienkiego profilu do wyznaczania charakterystyki aerodynamicznej 63

Michał CIAŁKOWSKI, Magda JOACHIMIAK, Aleksander OLEJNIK, Andrzej FRĄCKOWIAK, Krzysztof GRYSA
Bilans energii jako metoda quasi-regularyzacji zagadnienia Cauchy'ego w obszarze dwuwarstwowym 69

Michał CIAŁKOWSKI, Natalia LEWANDOWSKA, Marcin WAROT, Maciej MICKER
Podstawy fizyczne wyboru parametru diagnostycznego wzrostu złogów 81

Bartosz CIUPEK, Radosław JANKOWSKI, Karol GOŁOŚ
Analiza zamienności paliw stałych w aspekcie ograniczenia zapylenia powietrza w Polsce 99

Krzysztof CUR, Grzegorz WELTROWSKI
Metody wspomagania decyzji w kalkulacji strategicznej dla infrastruktury krytycznej 111

Paweł CZYŻEWSKI, Rafał ŚLEFARSKI
Gazy syntetyczne jako źródło wodoru dla systemów generacji energii 121

Grzegorz DAHLKE
Modele formalne pożarów i wybuchów w przygotowaniu infrastruktury krytycznej na sytuacje awaryjne 133

Przemysław DAROSZEWSKI, Juliusz HUBER
Nowa „normalność" w ochronie zdrowia – wpływ epidemii SARS-CoV 2 na realizację kontraktu podmiotu leczniczego w aspekcie zarządzania szpitalem uniwersyteckim .. 153

Hanna DZIDO, Leszek CWOJDZIŃSKI
Zagrożenia hybrydowe dla infrastruktury krytycznej państw członkowskich Unii Europejskiej 163

Tomasz EWERTOWSKI, Barbara KRAJEWSKA, Michalina ZEMBIK, Magdalena KARPA
Badanie przydatności wykorzystania nowoczesnych technologii GIS w sytuacjach kryzysowych dla wybranych dyscyplin zarządzania i stanów nadzwyczajnych 175

Maksymilian FALBIERSKI, Bartosz ZIEGLER
Projekt i analiza systemu równoważenia sił osiowych na wirniku turbopompy silnika rakietowego 193

Marta GALANT-GOŁĘBIEWSKA, Zuzanna KRĘC, Marta MACIEJEWSKA, Barbara MIKA
Analiza ryzyka i przyczyn zdarzeń lotniczych w różnych sektorach branży lotniczej w Polsce 209

Michał GOŁĘBIEWSKI, Marta GALANT-GOŁĘBIEWSKA, Marta MACIEJEWSKA
Analiza możliwości zapewnienia zapotrzebowania energetycznego symulatora lotu CKAS MotionSim5 na potrzeby szkolenia 221

Karol GOŁOŚ, Bartosz CIUPEK, Radosław JANKOWSKI
Perspektywa rozwoju źródeł energii cieplnej do ogrzewania budynków i obiektów strategicznych w kontekście poziomu stężeń gazowych zanieczyszczeń powietrza 233

Wiktor HOFFMANN
Wpływ emisji rakiet nośnych na atmosferę ziemską 247

Edyta JANEBA-BARTOSZEWICZ, Jarosław BARTOSZEWICZ, Wojciech SATKOWSKI
Ocena wpływu własności fizyko-chemicznych materiałów pędnych na bezpieczeństwo działań w bazach lotniczych 257

Edyta JANEBA-BARTOSZEWICZ, Bożena KARBOWSKA
Procedury bezpiecznego magazynowania i transportowania materiałów zakaźnych 269

Edyta JANEBA-BARTOSZEWICZ, Bożena KARBOWSKA
Transport środków specjalnego przeznaczenia wykorzystywanych w medycynie na przykładzie szczepionek przeciw COVID-19 283

Remigiusz JASIŃSKI, Paula KURZAWSKA, Kamila PRZESPOLEWSKA-GDOWIK
Zagrożenia ekologiczne w obszarze lotniska i ich wpływ na zdrowie i życie ludzi 299

Damian JOACHIMIAK, Tomasz BOROWCZYK, Magda JOACHIMIAK
Model procesu sprężania pary wodnej w reaktorze tłokowym dedykowany do wysokociśnieniowych procesów chemicznych 317

Magda JOACHIMIAK, Damian JOACHIMIAK, Aleksander OLEJNIK, Michał CIAŁKOWSKI
Wpływ właściwości termofizycznych stali na precyzyjne wyznaczenie warunków brzegowych w czasie nagrzewania w piecu do obróbki cieplno-chemicznej 333

Damian JOACHIMIAK, Wojciech JUDT, Magda JOACHIMIAK
Numeryczna analiza nagrzewania matrycy do wyciskania profili ze stopów aluminium pod kątem obróbki cieplno-chemicznej 347

Bożena KARBOWSKA, Edyta JANEBA-BARTOSZEWICZ
Zagrożenia wynikające z uwalniania talu, ołowiu i kadmu z naturalnych oraz antropogenicznych źródeł zanieczyszczeń 357

Bożena KARBOWSKA, Edyta JANEBA-BARTOSZEWICZ
Zastosowanie procedur frakcjonowania chemicznego do oceny ryzyka zanieczyszczeń środowiska naturalnego metalami ciężkimi 369

Maciej ADAMCZYK*
Adam KOZAKIEWICZ*
Maciej MAJCHER*

KIERUNKI ROZWOJU UKŁADÓW WLOTOWYCH W SAMOLOTACH BOJOWYCH

Projekt układu wlotowego jest niezwykle wymagającym zadaniem w każdym statku powietrznym napędzanym silnikiem turbinowym. W niniejszym artykule przedstawiono jak zmieniały się wloty powietrza w samolotach bojowych na przestrzeni lat, oraz jak wyglądają one dzisiaj. Omówiono jak zmieniająca się taktyka prowadzenia walki powietrznej wpływała na konstukcje układów wlotowych. Przedstawiono i omówiono również czynniki, które wpływały na kształtowanie układów wlotowych oraz trendy w ich projektowaniu w poszczególnych okresach rozwoju odrzutowych myśliwców.

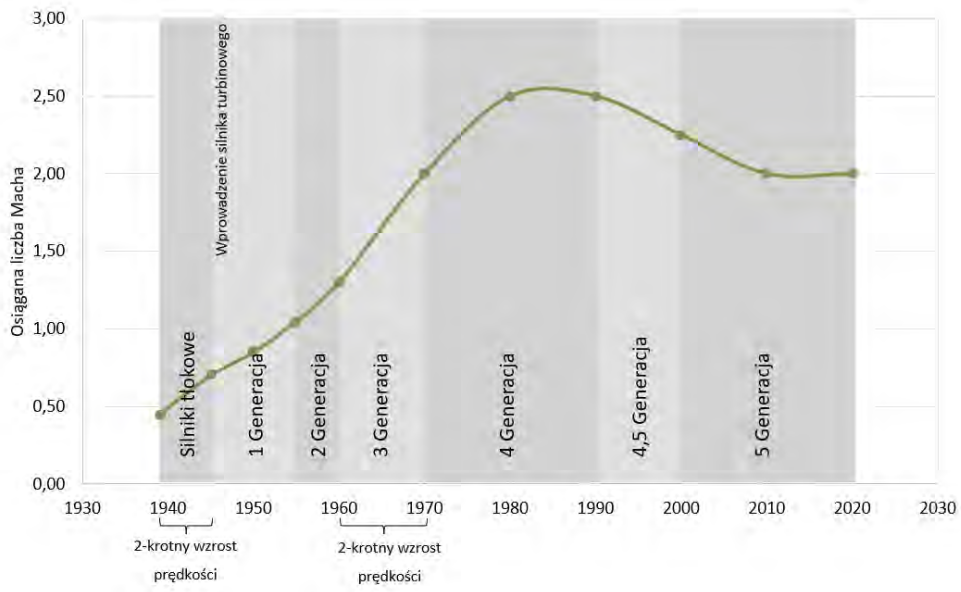
Słowa kluczowe: inżynieria mechaniczna, lotnictwo, silniki lotnicze, układy wlotowe, wloty

1. WPROWADZENIE

Wprowadzenie pod koniec II Wojny Światowej, silników turbinowych rozpoczęło nową erę w historii lotnictwa. Początkowe zastosowanie napędu tego rodzaju w lotnictwie wojskowym pozwoliło na stworzenie pierwszych bojowych odrzutowców, których osiągi i możliwości, po latach wykroczyły daleko poza wyobrażenia ich pierwszych konstruktorów. Nowa technologia zespołu napędowego spowodowała spektakularny rozwój takich osiągów jak prędkość (rys. 1), wznoszenie, manewrowość, zasięg, czy ładowność (rys. 2). W połączeniu z nowymi koncepcjami projektowania samolotów pozwoliło na wykonywanie operacji z liczbą Macha 3,0 na wysokościach przekraczających 50 000 stóp, a wiele myśliwców mogło zabierać uzbrojenie o większej masie niż ciężkie bombowce z okresu II Wojny Światowej. Konstrukcje samolotów bojowych ewoluowały w kierunku coraz większych prędkości i osiągów, jednak istotny wpływ na ich charakterystykę miała zmieniająca się

* Wojskowa Akademia Techniczna

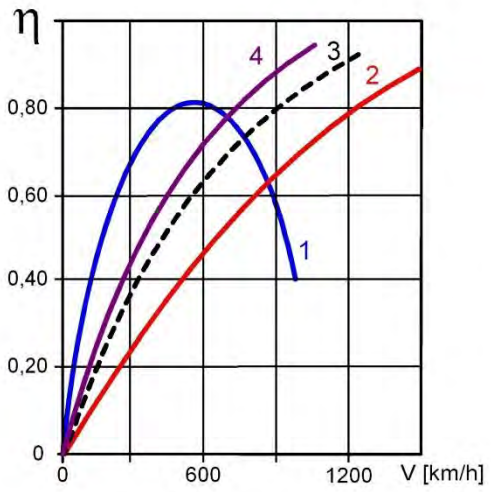
w poszczególnych latach taktyka prowadzenia walki powietrznej. Tylko w trakcie trwania II Wojny Światowej nastąpił dwukrotny wzrost osiąganych prędkości, który postępował w kolejnych latach i generacjach myśliwców, już po wprowadzeniu technologii silnika turbinowego. W szeroko rozumianym sektorze obronności przyjęło się opisywanie rozwoju odrzutowych myśliwców w ramach 5-ciu generacji [Kozakiewicz, Wróblewski, 2018]. Nie mają one jednoznacznie ustalonych kryteriów i istnieją pewne niewielkie różnice w klasyfikacjach definiowanych różnych autorów, organizacje czy samych producentów statków powietrznych, jednak dobrze kategoryzują one kluczowe etapy i przełomowe momenty w rozwoju technologii samolotów bojowych. Osiągane liczby Macha przez poszczególne generacje myśliwców przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Osiągane liczby Macha w poszczególnych generacjach myśliwców

Pierwsze samoloty bojowe z napędem turbinowym konstruowano w analogiczny sposób jak myśliwce z napędem śmigłowym. Pierwsze odrzutowce nie cechowały się znacząco lepszymi parametrami niż dotychczasowe samoloty z silnikami tłokowymi. Osiągały one większe prędkości lotu, jednak znacznie gorsze przyśpieszenia przez co często przegrywały w walce manewrowej z tradycyjnymi myśliwcami. Dodatkowo nowa technologia silników turbinowych cierpiała na „chorobę wieku dziecięcego" i przysparzała wielu problemów, w tym między innymi z trwałością turbin i ogólną niezawodnością całego podzespołu. Stosowano konwencjonalne uzbrojenie, przyrządy pokładowe, materiały, mechaniczne układy sterowania i tradycyjne układy

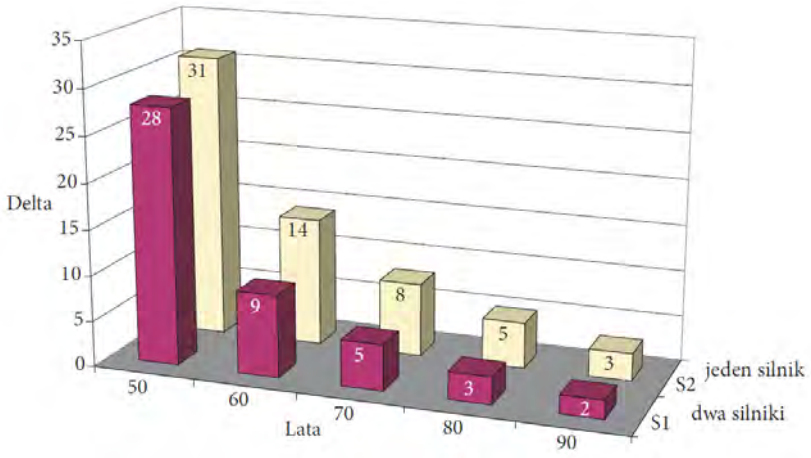
aerodynamiczne. W dalszym ciągu stosowano skrzydła proste lub trapezowe, co dla wysokich liczb Macha powodowało wiele problemów ze stabilnością i sterowaniem. Zbliżanie się do bariery dźwięku odkryło całkiem nową gamę problemów inżynierskich wymagających rozwiązania. Piloci myśliwców pierwszej generacji po raz pierwszy mogli doświadczyć takich zagadnień aerodynamiki wysokich prędkości jak skokowy wzrost oporu aerodynamicznego i spadek siły nośnej, odwrotne działanie lotek, czy buffeting. W związku z koniecznością stawienia czoła nowo odkrytym zjawiskom fizycznym, pierwszym przełomem w myśliwcach pierwszej generacji było wprowadzenie do konstrukcji skrzydeł skośnych w latach 50-tych. W tym czasie wprowadzono również usterzenie płytowe. Pierwszymi samolotami w takim układzie skrzydeł były rosyjskiej konstrukcji MiG-15 i amerykańskie F-86 Sabre, które toczyły pionierskie walki manewrowe w trakcie wojny w Korei [Whitford, 1995].



Rys. 2. Sprawność zespołu napędowego w funkcji prędkości lotu, gdzie: 1 – napęd śmigłowy, 2 – turbinowy silnik odrzutowy jednoprzepływowy, 3 – dwuprzepływowy turbinowy silnik odrzutowy do samolotu bojowego, 4 – dwuprzepływowy turbinowy silnik odrzutowy do samolotu komunikacyjnego [Kozakiewicz, 2010]

Myśliwce drugiej generacji cechowały się przede wszystkim osiąganiem prędkości naddźwiękowych. Bezpieczny lot z prędkością większą niż prędkość dźwięku, uważany niegdyś za mało prawdopodobny, stał się rzeczywistością i zmienił oblicze ówczesnej walki powietrznej. Loty z liczbą Macha większą od jedności umożliwiła poprawiona aerodynamika płatowców, oraz przede wszystkim wprowadzenie do silników turbinowych dopalacza, który zapewniał ciąg niezbędny do pokonania naddźwiękowych oporów powietrza. Stosowano usterzenie płytowe i zmienne geometrie ukła-

dów wlotowych oraz rozwinięto hydraulicznie wspomagane układy sterowania. Grubość profili lotniczych stosowanych na skrzydła spadła do wartości z przedziału 4÷7%. Równocześnie do uzbrojenia samolotów wprowadzono nowe rodzaje uzbrojenia np. kierowane pociski powietrze-powietrze. Oba te czynniki wpłynęły na zmianę w taktyce prowadzenia walki powietrznej. W owym czasie uznano, że koncepcja walki manewrowej między dwoma myśliwcami jest przestarzała i nie będzie stosowana na przyszłych polach bitew. W świetle tych zmian, oraz okresu trwającej zimnej wojny, pojawiła się koncepcja myśliwca przechwytującego, którego zadaniem miało być zwalczanie wrogich bombowców, które w domyśle miały przenosić broń jądrową. W efekcie tego konstruowane myśliwce (np. MiG-21, F-105) cechowały się wysokimi prędkościami lotu na dużych pułapach i nie wymagano od nich wykonywania forsownych manewrów przy granicznych kątach natarcia [Laurence i Loftin, 1985].



Rys. 3. Wskaźnik rocznych strat samolotow jedno- i dwusilnikowych [Kozakiewicz, 2009]

Trzecia generacja odrzutowych myśliwców przypada na lata wojny w Wietnamie i rozpoczyna erę samolotów wielozadaniowych. Konstrukcje wzbogacono o nowe rozwojowe układy aerodynamiczne, w tym zaawansowane mechanizacje płatowca (pojawiły się pierwsze zmienne geometrie skrzydeł), oraz wprowadzono dwuprzepływowe silniki turbinowe. Dotychczasowa koncepcja walki, zakładająca, że głównym zadaniem samolotu myśliwskiego jest zwalczanie innych statków powietrznych w ramach działań ofensywnych lub defensywnych uległa zmianie. Zaczęto dostrzegać potencjał ówczesnych myśliwców nie tylko w zdobywaniu przewagi powietrznej i misjach przechwytujących ale również w atakach na cele naziemne, interdyscyplinarnych misjach dalekiego zasięgu czy działaniach rozpoznawczych. W związku z ewolucją taktyki walki powietrznej, zaczęto na nowo zwracać uwagę na aspekt manewrowości statków

powietrznych. Pierwsze wersje flagowego myśliwca Stanów Zjednoczonych z tego okresu F-4 Phantom, zakładały jego rolę jako „mobilnej" wyrzutni pocisków rakietowych powietrze-powietrze, przez co nie zapewniono mu odpowiedniej manewrowości. Jednak pierwsze lata konfliktu w Wietnamie, szybko ujawniły ten mankament samolotu, który w bliskich starciach z przeciwnikami typu MiG-17 i MiG-19 stwarzał poważne problemy. Aby rozwiązać tę kwestię poproszono NASA o przeprojektowanie skrzydeł samolotu w celu poprawienia jego charakterystyki w walce manewrowej oraz wyposażono go w dodatkowe działko do walki na bliskim dystansie, co ostatecznie zaowocowało wersją samolotu oznaczoną F-4E, którą wprowadzono do działań w 1967 roku [Chambers, 2000].

Myśliwce czwartej generacji, których konstrukcje zaprojektowano w latach 70-tych są wykorzystywane do dzisiaj, w swoich zmodernizowanych i rozwojowych wersjach. W tym okresie rozwijała się koncepcja myśliwców wielozadaniowych. Doświadczenia z konfliktu w Wietnamie pokazały, że wysoka manewrowość samolotów bojowych pozostaje kluczowym czynnikiem na polu walki. Jako wysoką manewrowość uznawano w szczególności zdolność statku powietrznego do wykonywania zakrętów (ang. turning performance). W sytuacji walki pomiędzy dwoma myśliwcami lecącymi z tą samą prędkością, samolot zdolny do wykonania zakrętu o najmniejszym promieniu bez utraty wysokości ma zazwyczaj przewagę. Dążenie do budowy wysokomanewrowych samolotów skutkowało wprowadzeniem do konstrukcji koncepcji obniżonej stateczności statycznej (ang. relaxed static stability). Zakładała ona, że projektowany samolot pozostaje niestateczny statycznie w pewnym ograniczonym stopniu, a stabilność jego lotu będzie nadzorowana przez wytężoną pracę automatycznych układów sterowania. To zadanie stało się możliwe do realizacji po wprowadzaniu zaawansowanych komputerów do układów sterowania oraz opracowaniu pierwszych systemów klasy fly-by-wire. Równolegle pojawiła się również koncepcja myśliwców przewagi powietrznej. Zakładała ona, że trzon sił powietrznych powinny stanowić mniej zaawansowane i tańsze w produkcji myśliwce wielozadaniowe (z takim założeniem opracowano m.in. F-16), a niewielką część całego lotnictwa stanowiłby samoloty przewagi powietrznej, które dzięki wysoce zaawansowanej technologii zapewniałyby pełną dominację w powietrzu. W kolejnych latach myśliwce czwartej generacji były ulepszane i modernizowane. Wprowadzano do ich konstrukcji nowe materiały, dopracowywano projekty aerodynamiczne, wprowadzano elementy technologii „stealth", ograniczającej odbicia radarowe i przede wszystkim instalowano nowe, zaawansowane systemy uzbrojenia i awionikę. Z tego powodu często wyróżnia się generację pośrednią między czwartą i piątą [Martinic, 2015].

Tabela 1

Charakterystyka myśliwców w podziale na generacje

Gen.	Lata	Opis	Przykłady
1	1943-1950	Skrzydła proste/trapezowe, konstrukcje podobne do samolotów śmigłowych, konwencjonalne uzbrojenie, mechaniczne układy sterowania	Me 262, Gloster Meteor, de Havilland Vampire, P-80 Shooting Star
	1953-1955	Skrzydła skośne, pierwsze radary, pierwsze usterzenie płytowe, pierwsze hydromechaniczne układy sterowania	MIG-15, F-86 Sabre
2	1955-1960	Skrzydła skośne/delta, usterzenie płytowe, pierwsze rakiety powietrze-powietrze, radary dalekiego zasięgu, powszechne wprowadzenie dopalaczy, odejście od koncepcji walki manewrowej (myśliwce przechwytujące)	MIG-21, Electric Lightning, F-105, F-100
3	1960-1970	Początek myśliwców wielozadaniowych, wprowadzenie silników dwuprzepływowych, zaawansowana aerodynamika i mechanizacja płatowca, powrót znaczenia manewrowości	F-4 Phantom, F-111 MIG-23, Su-17, Harrier
4	1970-1990	Rozwój koncepcji myśliwców wielozadaniowych, nacisk na wysoką manewrowość samolotu, wprowadzenie koncepcji „relaxed static stability", systemy fly-by-wire, zaawansowana awionika, HUD, koncepcja myśliwców przewagi powietrznej.	F-15, F-16, F-14, F-18, Mirage 2000
4,5	1990-2000	Przeprojektowanie myśliwców 4-tej generacji na nowe materiały i awionikę, wprowadzenie elementów technologii stealth	Eurofighter, Rafale, JAS 39 Gripen, F-16, F-15, F-18, Su-30, Su-35
5	2000+	Rozwój technologii stealth (w tym wewnętrzne uzbrojenie), skrócony start i lądowanie, materiały kompozytowe, samoloty zintegrowane sieciowo,	F-22, F-35, Su-57, J-20

Piąta generacja myśliwców to obecnie najbardziej zaawansowane technologicznie statki powietrzne. Uznaje się kilka cech szczegółowych samolotu, które pozwalają zakwalifikować go jako myśliwiec piątej generacji. Przede wszystkim musi charakteryzować się wysoką manewrowością w szerokim zakresie prędkości i wysokości lotu. Dodatkowe układy wspomagające niniejsze to np. wektorowanie ciągu. Samolot tej generacji ma również odznaczać się możliwością wykonywania lotów w trybie tzw. „super-cruise", czyli z prędkością naddźwiękową bez użycia dopalacza. Co więcej, płatowiec piątej generacji powinien być w pełni wykonany w technologii „stealth", wliczając w to możliwie maksymalne ukrycie wentylatora silnika wewnątrz kadłuba, minimalizację widoczności gazów wylotowych oraz stosowanie wewnętrznego uzbrojenia (całkowita rezygnacja z osprzętu podwieszanego pod skrzydłami). Zwraca się również uwagę na wysoki stosunek ciągu do masy (ang. thrust to weigth ratio) oraz możliwość wykonywania skróconego startu i lądowania. W kategorii awioniki i systemów elektronicznych, myśliwce piątej generacji są w pełni produktem ery informacji. Zaawansowane systemy optoelektroniczne pozwalają na namierzanie i śledzenie wielu celów równocześnie, a zintegrowane systemy zobrazowania „sensor fusion", zapewniają pilotowi w pełni sferyczny obraz sytuacji wokół samolotu. Samolot tej klasy ma być również sieciocentryczny i wymieniać się danymi z innymi maszynami działań (również wojsk naziemnych) na temat aktualnej sytuacji taktycznej w obszarze. Kwestie systemowo-awioniczne są równie kluczowe jak konstrukcja, aerodynamika i uzbrojenie. Przykładowo, oprogramowanie samolotów piątej generacji może mieć ponad 17 mln linijek kodu [Eurofighter World, 2010]. W tabeli 1 zestawiono charakterystyczne cechy myśliwców każdej z generacji oraz flagowe konstrukcje z danego okresu.

2. PARAMETRY UKŁADÓW WLOTOWYCH

Badania układów wlotowych mające na celu określenie ich sprawności i charakterystyki opisuje się kilkoma kluczowymi parametrami. Podstawowym parametrem określającym sprawność wlotu jest współczynnik strat ciśnienia (1) (ang. total pressure recovery). Definicja opisuje go jako stosunek ciśnienia na końcu i na początku kanału wlotowego lub iloczyn współczynników:

$$\sigma_{wl}^{*} = \frac{p_1^{*}}{p_H^{*}} = \sigma_f^{*}\sigma_t^{*} \tag{1}$$

gdzie,
σ_{wl}^{*} – współczynnik strat ciśnienia
p_1^{*} – ciśnienie całkowite w przekroju wyjściowym wlotu
p_H^{*} – ciśnienie całkowite w przekroju wejściowym wlotu
σ_f^{*} – współczynnik strat falowych
σ_t^{*} – współczynnik strat tarcia

Współczynnik strat ciśnienia odnosi się do wewnętrznej sprawności kanału wlotowego i istotnie wpływa na ciąg silnika poprzez masowe natężenie przepływu. Szacuje się, że na każdy 1% zwiększenia strat ciśnienia, ciąg zespołu napędowego maleje o tę samą lub większą wartość. Zjawisko nasila się i ma nieliniowy charakter, szczególnie dla dużych liczb Macha, gdzie np. dla liczby Macha=2,0 przy stracie ciśnienia na poziomie 8%, ciąg zespołu napędowego spada o 13% przy jednoczesnym wzroście zużycia paliwa o 5% [Whitford, 1987]. Na straty ciśnienia w układzie wlotowym główny wpływ mają dwie składowe: tarcie strumienia powietrza o ścianki kanału wlotowego σ_t^{*} oraz straty związane z powstawaniem fal uderzeniowych σ_f^{*}, które silnie rosną dla około dźwiękowych i naddźwiękowych prędkości lotu. Przykładowe wartości współczynnika falowego przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2
Przykładowe wartości współczynnika strat falowych w zależności od liczby Macha

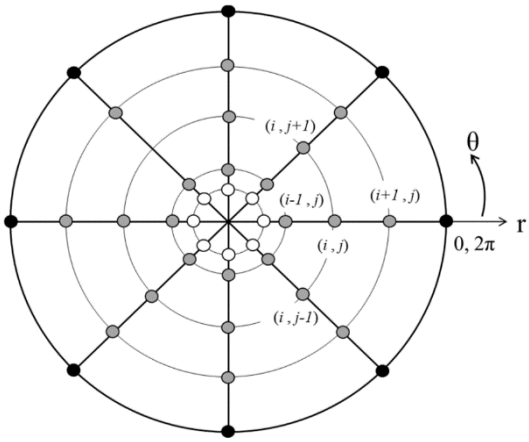
Ma	0,6	1,2	2,5	3,5
σ_{fal}^{*}	1,0	0,88	0,54	0,35

Współczynnik strat ciśnienia jest relatywnie prostym parametrem, bazującym na średnich wartościach ciśnienia w wybranym przekroju układu i nie uwzględnia on pola tego parametru. Z tego powodu drugim kluczowym parametrem układu wlotowego są wytwarzane przez niego zaburzenia przepływu. Współczynnik zaburzenia (ang. distortion index) jest w istocie rozkładem współczynnika strat ciśnienia w wybranej płaszczyźnie przekroju kanału wlotowego, a jego wyznaczenie na analizie pola ciśnienia. Jest to stosunek ciśnienia w danym punkcie odniesiony do średniego ciśnienia w danym przekroju.

$$\Delta p = \frac{p_i}{p_{śr}} \tag{2}$$

gdzie,
Δp- współczynnik zaburzenia
p_i - ciśnienie statyczne w rozpatrywanym punkcie
$p_{śr}$ - ciśnienie statyczne średnie w danym przekroju

Jednak tak zapisanym wzór odnosi się tylko do danego punktu pomiarowego. W praktyce wyznaczenie współczynnika zaburzeń, wyrażonego przez jedną wartość liczbową dotyczącą całego przekroju jest bardziej złożone i stosuje się w tym celu kilka metod. W pierwszej kolejności dla wyjściowego pola przekroju układu wlotowego do sprężarki (ang. aerodynamic interface plane – AIP) wyznacza się rozkład punktów pomiarowych wzdłuż promienia i po obwodzie płaszczyzny przekroju. Przykład takiego rozkładu punktów przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Przykładowy rozkład punktów pomiarowych na płaszczyźnie wyjściowej z układu wlotowego [Zachos et. al., 2017]

Następnie dla tak wyznaczonych punktów oblicza się obwodowy współczynnik zaburzenia CDI (ang. circumferential distortion index), oraz promieniowy współczynnik zaburzenia RDI (ang. radial distorition index). Oba rodzaje współczynnika oceniają jednorodność pola ciśnienia w poszczególnych kierunkach i są opisane następującą zależnością:

$$CDI=Max_{i=1}^{n_{r-1}}\left[0{,}5\left(\frac{p_{0,i}-p_{0,min_i}}{p_{0,śr}}+\frac{p_{0,i+1}-p_{0,min_{i+1}}}{p_{0,śr}}\right)\right] \quad (3)$$

gdzie,
CDI – obwodowy współczynnik zaburzenia
$p_{0,i}$ – średnie ciśnienie dla i-tego okręgu

$p_{0,śr}$ – średnie ciśnienie dla całego przekroju
$p_{0,min\ i}$ – minimalne ciśnienie dla i-tego okręgu

$$RDI=Max\left(\frac{p_{0,śr}-p_{0,w}}{p_{0,śr}}+\frac{p_{0,śr}-p_{0,z}}{p_{0,śr}}\right) \tag{4}$$

gdzie,
RDI – promieniowy współczynnik zaburzenia
$p_{0,w}$ – średnie ciśnienie dla wewnętrznego okręgu
$p_{0,śr}$ – średnie ciśnienie dla całego przekroju
$p_{0,z}$ – średnie ciśnienie dla zewnętrznego okręgu

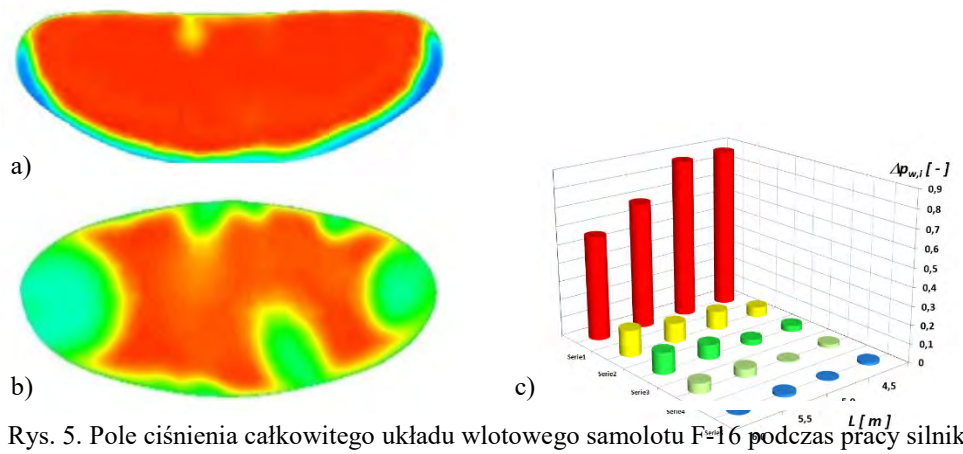
Podane współczynniki zaburzenia wyznacza się dla przekroju wyjściowego układu wlotowego, tj. przekroju bezpośrednio przed sprężarką silnika, gdyż ma on największe znaczenie dla stabilności pracy sprężarki i całego podzespołu. Ponieważ przekrój wyjściowy zawsze jest przekrojem kołowym, to powyższych metod nie można zastosować chcąc badać inne szczególne przekroje kanału wlotowego. W takich sytuacjach należy się posiłkować innymi metodami. Jedną z propozycji może być zastosowanie bezwymiarowego współczynnika, uwzględniającego poszczególne pola przekroju [Kozakiewicz, et. al., 2021].

$$\Delta p=\frac{p_i A_i}{\sum_{k=1}^{k=n} p_k A_k} \tag{5}$$

gdzie,
Δp – współczynnik zaburzenia
p_i – ciśnienie spiętrzenia w rozpatrywanym obszarze
A_i – pole rozpatrywanego obszaru ciśnienia
p_k – ciśnienie statyczne średnie w danym przekroju
A_k – pole rozpatrywanego przekroju wlotu

Zaburzenie strumienia dla lotu poziomego co do zasady powinno być niewielkie, a układ wlotowy w warunkach ustalonych powinien dostarczać jednorodny strumień powietrza. Zwiększone zaburzenia pojawiają się w szczególności w trakcie manewrowania statku powietrznego, kiedy pojawiają się niezerowe kąty natarcia i kąty ślizgu. Wraz ze wzrostem znaczenia manewrowości samolotów bojowych, układy wlotowe projektuje się tak aby zapewniały większą stabilność pracy zespołu napędowego w szerokim zakresie kątów natarcia i ślizgu, kosztem słabszych parametrów w locie

poziomym. Przykładowy rozkład pola ciśnienia układu wlotowego samolotu F-16 przestawiono na rysunku 5.



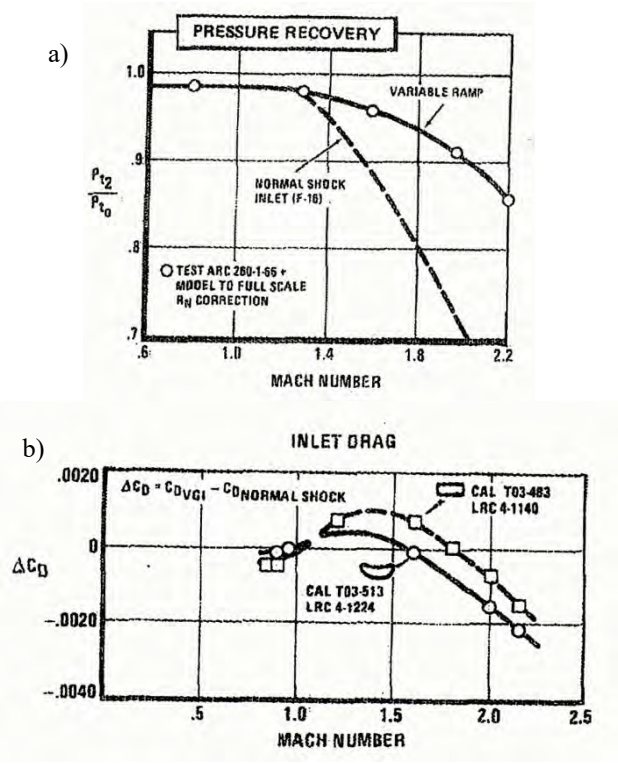
Rys. 5. Pole ciśnienia całkowitego układu wlotowego samolotu F-16 podczas pracy silnika na ziemi (a) przekrój wejściowy, b) 1,5 metra od przekroju wejściowego, c) Analiza rozkładu zmian pól ciśnienia w kanale przepływowym, gdzie: L – odległość od noska samolotu, A_w – względna powierzchnia danego ciśnienia, ciśnienia całkowite [Kozakiewicz, et. al., 2021]

3. EWOLUCJA UKŁADÓW WLOTOWYCH LOTNICTWA WOJSKOWEGO

Zadaniem konstruktorów poszczególnych podzespołów i systemów jest zapewnienie ich integralności i optymalizacji pod kątem zmieniającego się charakteru realizowanych misji przez samoloty bojowe. W wyniku ewolucji tych wymagań powstawały i rozwijały się kolejne koncepcje w projektowaniu poszczególnych podzespołów i systemów, w tym zespołu napędowego i jego poszczególnych składowych. Zmianom podlegały również projekty układów wlotowych silnika. Wraz z rozwojem technologii wprowadzano do konstrukcji zarówno nowe geometrie, kształty, a także zmieniano położenie wlotu w całym układzie aerodynamicznym jak i również wprowadzano elementy mechanizacji całego układu. Aby dobrze zrozumieć historyczne zmiany i kierunki w projektowaniu układów wlotowych, nie można ich analizować w oderwaniu od całego kontekstu historycznego związanego z rozwojem samolotów bojowych.

3.1. Kompromisy w projektowaniu układów wlotowych

Wszystkie silniki lotnicze są urządzeniami wymagającymi doprowadzenia powietrza z atmosfery niezbędnego do ich pracy (obecnie do 1200 kg/s). Podstawowym zadaniem układu wlotowego jest wstępne sprężenie i przede wszystkim doprowadzenie odpowiedniej ilości, stabilnego, jednorodnego strumienia powietrza do sprężarki silnika. Co więcej, zadanie to musi być realizowane przez układ wlotowy w szerokim zakresie prędkości i wysokości lotu. Powoduje to, że problem konstrukcji wlotu staje się niezwykle złożonym zagadnieniem uwzględniającym szereg kompromisów i decyzji konstruktorów. Główny kompromis w projektowaniu układów wlotowych zawiera się w balansowaniu między parametrami określającymi straty ciśnienia, a oporem aerodynamicznym wlotu. Niskie straty ciśnienia wpływają korzystnie na ciąg i osiągi silnika.



Rys. 6. Przykładowa charakterystyka układu wlotowego, a) współczynnik strat ciśnienia, b) współczynnik oporu [Hunter, Hawkins, 1981]

Najniższe straty uzyskuje się kiedy wlot pracuje jako układ izolowany przepływowo, w strumieniu niezaburzonego powietrza, np. pod skrzydłem. Jednak takie umiejscowienie wlotu powoduje znaczny wzrost oporu aerodynamicznego całej konstrukcji samolotu, co w przypadku lotnictwa wojskowego jest niedopuszczalne. Z tego powodu konstruktorzy zaczęli projektować układy wlotowe przybliżając je do kadłuba. W wyniku tego odkryto kolejny problem techniczny jakim jest zagadnienie kierowania warstwy przyściennej z kadłuba do kanału dolotowego, co negatywnie wpływa na ciąg silnika, zasysającego w tej sytuacji strumień turbulentny. Tworzenie zwartych konstrukcji powodowało również inny problem, jakim jest dostępne miejsce w kadłubie samolotu. Układ wlotowy zajmujący zbyt dużo miejsca, zapewniał często niski opór aerodynamiczny i niskie straty ciśnienia, jednak powodował trudności z miejscem na kabinę pilota, uzbrojenie, awionikę czy inne instalacje płatowca. Wymagania dotyczące wykrywalności radarowej samolotów spowodowały konieczność ukrycia silnika wewnątrz kadłuba, tak aby wentylator nie był widoczny z zewnątrz. W wyniku tego nastąpiła konieczność wygięcia kanałów wlotowych, co również wpływało negatywnie na parametry strat ciśnienia i generowane zaburzenia. Dodatkowo, w niektórych konstrukcjach pojawiła się konieczność łączenia dwóch kanałów w jeden (wloty typu Y) i przejścia z przekroju prostokątnego do kołowego. Wszystkie te zabiegi, mające na celu zapewnienie innych funkcjonalności, negatywnie wpływają na współczynniki określające jakość strumienia powietrza (jednorodne pole ciśnienia wlotowego) przez co obniżają ciąg i osiągi silnika. Decyzja o umiejscowieniu układu wlotowego wpływa również na dostępne miejsce na uzbrojenie. Wloty boczne zostawiają przestrzeń pod kadłubem, która może zostać wykorzystana na podwieszenie dodatkowego uzbrojenia, ładunku, czy zbiorników z paliwem. Wloty, które są umieszone pod kadłubem mają prostszą geometrię jednak, ich dodatkowym mankamentem jest zwiększone ryzyko zassania obiektów FOD (ang. Foreign Object Damage) z płyty lotniska podczas kołowania. Kolejnym zagadnieniem, które należy uwzględniać w projektowaniu układów wlotowych są aspekty ich masy i wytrzymałości. Struktury pracujące w obszarach fal uderzeniowych podlegają znacznym obciążeniom ciśnieniowym. Co więcej, w przypadku układów z mechanizacją geometrii, zagadnienie to staje się bardziej złożone. Dodatkowym istotnym aspektem, który z czasem zyskał uwagę konstruktorów jest skomplikowanie i koszt wykonania układu. Szczególnie rozwój koncepcji masowo produkowanych, niskokosztowych myśliwców, mających stanowić trzon sił powietrznych (np. F-16) spowodował dodanie również tego kryterium optymalizacyjnego. Ostateczenie istotnym aspektem układów wlotowych współczesnych samolotów wysokomanewrowych jest charakterystyka ich pracy na wysokich kątach natarcia, ekstremalnych przechyleniach i manewrach. Kosztem rozszerzenia stabilnego zakresu pracy układu wlotowego są najczęściej obniżone parametry w warunkach lotu ustalonego, a konstruktorzy rozwijają projekty spełniające te kryteria, aby konstrukcja mogła jak najlepiej realizować wyznaczone dla niej misje. Projekt układu wlotowego, który pozornie jest prostym podzespołem, wiąże się z podjęciem wielu decyzji, które wpływają nie tylko na osiągi zespołu napędowego ale również na ogólną funkcjonalność całego samolotu [Whitford, 1987].

3.2. Układy wlotowe myśliwców 1-szej generacji

Okres II Wojny Światowej sprzyjał rozwojowi techniki lotniczej. Tylko w trakcie jej trwania dwukrotnie zwiększono prędkość osiąganą przez samoloty bojowe. W realiach ówczesnej taktyki walk powietrznych najistotniejszymi czynnikami stanowiącymi o osiąganiu przewagi powietrznej była prędkość i wysokość lotu. Chęć osiągania coraz większych prędkości doprowadziła do wdrożenia do lotnictwa wojskowego silników turbinowych. Początkowo samoloty konstruowano w tradycyjny, znany do tej pory sposób, stosując nadal skrzydła proste i trapezowe, a układy aerodynamiczne były identyczne jak dla myśliwców z silnikami tłokowymi. Pierwsze odrzutowce nie cechowały się znacząco lepszymi parametrami niż dotychczasowe samoloty z napędem śmigłowym. Osiągały one większe prędkości lotu, jednak znacznie gorsze przyśpieszenia przez co często przegrywały w walce manewrowej z tradycyjnymi myśliwcami. Dodatkowo nowa technologia silników turbinowych przysparzała wielu problemów, w tym między innymi z trwałością turbin i ogólną niezawodnością całego podzespołu [Hallion, 1990].

Układy wlotowe do pierwszych silników turbinowych projektowano tradycyjnie w tzw. układzie typu „pitot tube intake". W ówczesnym czasie mnogość zagadnień i decyzji, które należy dokonać przy projektowaniu wlotu do samolotu bojowego nie była jeszcze w pełni znana. Dlatego wloty konstruowano w sposób prosty dla silników umieszczonych pod skrzydłami. Układ ten jest do dziś stosowany w samolotach pasażerskich, gdyż zapewnia niskie straty ciśnienia na wlocie (silniki pracują w przepływie niezaburzonym), a przez to gwarantuje dużą stabilność pracy zespołu napędowego i bezpieczeństwo lotu oraz nie zabiera cennego miejsca w kadłubie samolotu. Poza wymienionymi zaletami, podstawową wadą takiego układu jest duży opór aerodynamiczny generowany przez wyeksponowane gondole silnika oraz podatność na zassanie ciał obcych do kanału przepływowego. Flagowe konstrukcje pierwszych odrzutowych myśliwców z wlotami typu „pitot-intake" pokazano na rysunku 7. Samolot Me 262, niemieckiej konstrukcji wprowadzono do służby pod koniec wojny w 1944 roku, a brytyjski Gloster Meteor, kilka tygodniu później.

a) b)

Rys. 7. Przykładowe konstrukcje myśliwców 1-szej generacji z wlotami typu „pitot-intake" (a) Gloster Meteor [warbirdsnews.com], b) Messerschmitt Me 262 [airplane-pictures.com])

Z powodu znacznych oporów aerodynamicznych wlotów powietrza, w kolejnych konstrukcjach samolotów zaczęto umieszczać wloty bliżej kadłuba, a sam silnik zabudowywano w centralnej części samolotu. Jednym z rozwiązań, aby dostarczyć powietrze do tak zabudowanej jednostki napędowej, popularnym w brytyjskich konstrukcjach, były wloty powietrza zintegrowane z mocowaniem skrzydła, tzw. „wing-root intake". Czyniło to układ bardziej zwartym, nie zabierało cennego miejsca w kadłubie, zostawiając całą przestrzeń na przodzie płatowca i częściowo rozwiązywałoproblem dużego oporu aerodynamicznego samolotu. Okazało się jednak, że układy tego typu prowadziły do kolejnych wyzwań konstrukcyjnych. Pierwszym zagadanieniem było zasysanie przez układ wlotowy warstwy przyściennej z kadłuba, co pogarszało osiągi zespołu napędowego. W tamtym okresie to zjawisko było już znane, jednak nie tak szczegółowo zbadane jak współcześnie. Dodatkowo wloty umieszczone w mocowaniach skrzydeł miały inną, niezwykle istotną wadę, gdyż ograniczały zastosowanie skrzydeł skośnych. Okazało się, że krawędź wlotu umieszona pod kątem do napływającego strumienia powodowała dość duże straty ciśnienia na niskich prędkościach lotu. Większość powietrza była wprowadzana do kanału silnika przez tylną część wlotu, gdzie zmieniała kierunek przepływu na jego tylnej ścianie, co prowadziło do znacznych wzrostów prędkości strumienia, lokalnych fal uderzeniowych i strat ciśnienia, zarówno jego średniej wartości jak i niejednorodności pola. Sytuacja pogarszała się przy większych prędkościach lotu, gdzie zjawisko prowadziło do powstawania przepływów zwrotnych na tylnej krawędzi wlot, co znacznie zwiększało opór aerodynamiczny [Goldsmith, Seddon, 1993]. Wraz ze wzrostem prędkości samolotów, a co za tym idzie koniecznością stosowania coraz większych skosów skrzydeł, wloty typu „wing-root" przestały mieć zasadność stosowania. Przykładowymi statkami powietrznymi, w którzym wlot zaprojektowano w tym układzie to De Havilland Vampire, Hawker Hunter, Avro Vulcan, czy De Havilland Comet, z czego dwa pierwsze pokazano na rysunku 8.

a) b)

Rys. 8. Konstrukcje myśliwców 1-szej generacji z wlotami typu „wing-root intake” (a) De Havilland Vampire [crewdaily.com], b) Hawker Hunter [flickr.com])

Zagadnienie doprowadzenia powietrza do silników umieszczonych centralnie w kadłubie w inny sposób rozwiązywano w konstrukcjach amerykańskich, gdzie w dużej mierze decydowano się na wloty boczne, umieszczone na kadłubie pod kabiną pilota. NASA opracowało dwie koncepcje wlotu tego typu, wersję „scoop-intake”, gdzie wlot jest osobnym elementem o przekroju będącym fragmentem koła, umieszoanym bardzo blisko kadłuba, oraz wersję „submerged-intake”, gdzie obszar wlotu jest wbudowany w kadłub, nie zwiększając przy tym przekroju poprzecznego płatowca. Zaletą tego typu układów wlotowych był przede wszystkim niski wpływ na opór aerodynamiczny całego samolotu. Nie były one również zależne w żaden sposób od ogólnego układu aerodynaczminego statku powietrznego. Nie istniał również konflikt z miejscem w kadłubie na kabinę pilota. Projektowane w owym czasie wloty boczne zapeniwały relatywnie dobre charakteryski w zakresie niskich jak i okołodźwiękowych prędkości. Natomiast wadami tego typu układów był wpływ warstwy przyściennej wchodzącej do kanału dolotowego z kadłuba. Istotnym wnioskiem z testów wlotów było to, że straty związane z warstwą przyścienną na ściankach są stosunkowo niewielkie, w porównaniu do strat na powierzchniach sprężających [Sacks, Spreiter, 1951]. Przykładowe układy przykadłubowych wlotów przedstawiono na rysunku 9.

a) b)

Rys. 9. Konstrukcje myśliwców 1-szej generacji z wlotami przykadłubowymi (a) YF-93A z wlotem typu „submerged" [nationalmuseum.af.mil], b) Lockheed F-80 Shooting Star [airshowstuff.com])

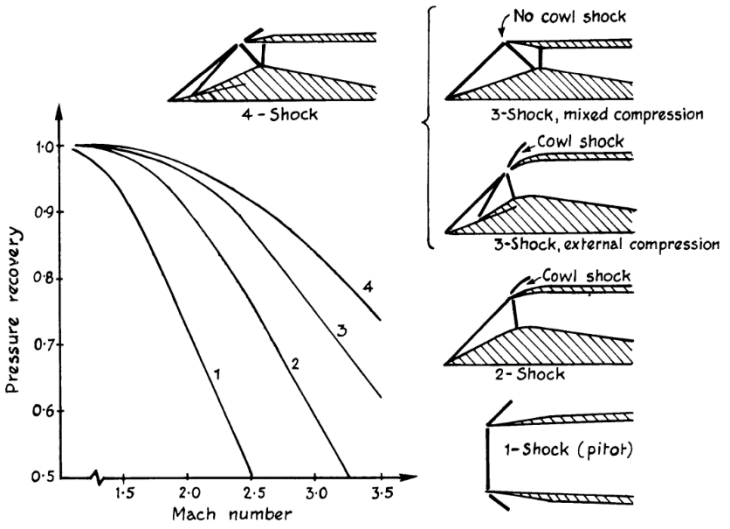
Kolejnym sposobem kształtowania układów wlotowych myśliwców pierwszej generacji, były wloty w układzie czołowym, znajdujące się na nosie samolotu. W tym układzie zasadniczo płatowiec zostaje zbudowny dookoła kanału wlotowego. Zaletą wlotów czołowych jest ich praca w strumieniu niezaburzonym, co zapewnia niskie straty ciśnienia na wlocie oraz jednorodne pole strumienia. Jednak podstawową wadą wlotów tego typu jest ich rozmiar. Z jednej strony powoduje to, że cała konstrukcja układu jest relatywnie ciężka, a kanał dolotowy długi, co skutkuje zwiększonymi stratami związanymi z warstwą przyścienną już w samym kanale. Z drugiej strony wlot czołowy zajmuje znaczną część przestrzeni w kadłubie, która mogłaby być wykorzystana na paliwo, uzbrojenie, osprzęt lub inne ładunki. Problem również dotyczy samego miejsca na kabinę pilota, która musi zostać umieszczona nad kanałem wlotowym lub kanał ten musi ją ominąć poprzez rozdzielenie. Wloty czołowe również nie były odpowiednie do wykonywania lotów z prędkościami naddźwiękowymi, z powodu prostopadłej fali uderzeniowej powstającej na tego typu elemencie konstrukcyjnym. Wadą układu również był brak możliwości i miejsca na umieszczenie radaru, co stało się niezwykle istotne wraz z ewolucją walki powietrznej [Surber, Robinson, 1983]. Przykładowe konstrucje samolotów z wlotami czołowymi to, F-100 Super Sabre, F-84 Thunderjet, F-86 Sabre, MiG-15. Dwie ostatnie konstrukcje przedstawiono na rysunku 10. Stanowiły trzon sił powietrznych stron w Wojnie w Korei i prowadziły pierwsze walki powietrzne myśliwców po II WŚ.

a) b)

Rys. 10. Konstrukcje myśliwców 1-szej generacji z wlotami czołowymi (a) MiG-15 [hesja.pl], b) F-86 Sabre [igdb.com])

3.3. Układy wlotowe myśliwców 2-giej generacji

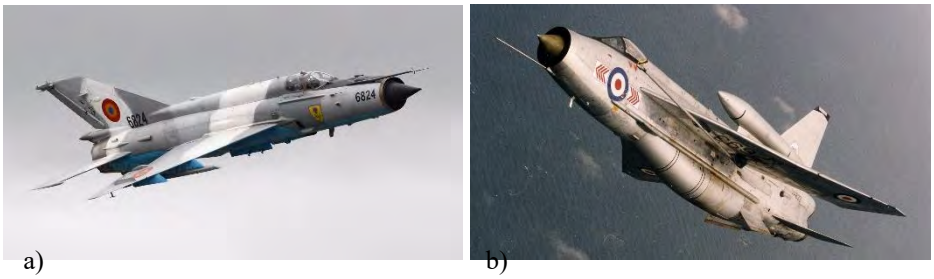
Myśliwce drugiej generacji wprowadziły lotnictwo w erę lotów naddźwiękowych. Umożliwiło to wprowadzenie dopalaczy do zespołów napędowych oraz nowe konstrukcje aerodynamiczne przystosowane do przekraczania bariery dźwięku. Dodatkowo wprowadzenie do wyposażenia samolotów bojowych radarów dalekiego zasięgu oraz pierwszych kierowanych rakiet powietrze-powietrze zapoczątkowało odejście od koncepcji walki manewrowej. Z powyższych powodów stratedzy wojskowi zaczęli postrzegać myśliwce jako latające „wyrzutnie rakiet". W owym czasie rozpowszechniło się przekonanie, że walka powietrzna między dwoma myśliwcami w bliskim kontakcie, gdzie piloci wykonują ekstremalne manewry, przejdzie na zawsze do historii. W wyniku zmian w koncepcji płatowca i taktyki walki, układy wlotowe musiały sprostać nowym wymaganiom. Przedewszystkim ich projekty musiały zapewniać niskie straty ciśnienia w trakcie pracy w warunkach lotów naddźwiękowych, w tym dbać o optymalne wprowadzenie fali uderzeniowej do kanału wlotowego i efektywne wyhamowanie strumienia powietrza do prędkości podźwiękowej. Już w trakcie II WŚ zauważono, że niskie straty ciśnienia w takim układzie można uzyskać stosując ustawione pod odpowiednim kątem powierzchnie sprężające, które wytworzą jedną lub więcej skośnych fal uderzeniowych przed otworem wlotowym w celu spowolnienia strumienia powietrza przed wytworzeniem fali prostopadłej. Przykładowe charakterystyki wlotów pod kątem współczynnika strat ciśnienia, w zależności od liczby i układu fal uderzeniowych zaprezentowano na rysunku 11.



Rys. 11. Charakteryska zmian współczynnika strat ciśnienia naddźwiękowych układów wlotowych w zależności od liczby i układu fal uderzeniowych [Whitford,1987]

Ponieważ głównie koncentrowano się na zagadnieniu osiągnięcia korzystnych charakterystyk pracy wlotu dla prędkości przelotowych i nadźwiękowych, a zagadnienie manewrowości statku powietrznego było marginalizowane to układy wlotowe w większości myśliwców drugiej generacji przybrały postać wlotów czołowych ze stożkiem. Była to naturalna ewolucja z poprzednio stosowanych wlotów umieszczonych w nosie samolotu. Montowane centralnie stożki często posiadały również elementy mechanizacji, które wysuwały lub chowały powierzchnię stożkową w zależności od prędkości lotu tak aby utrzymać optymalny układ fal uderzeniowych. Zaletą układu ze stożkiem był efektywny sposób wytworzenia fali skośnej i wprowadzenia powietrza do silnika oraz prostota konstrukcji, która korzystnie wpływała na masę całego układu. Dodatkowo element w postaci centralnego stożka na nosie samolotu jest naturalnym miejscem na umieszczenie radaru.W tamtym czasie przestrzeń pod stożkiem była wystarczająca dla stosowanych urządzeń. Wadą układu czołowego ze stożkiem pozostaje problem miejca w kadłubie. Charakteryzuje się on również stosunkowo dużymi spadkami parametrów przy przepływach niesymetrycznych dotyczących kątów natarcia czy ślizgu oraz ma stosunkowo niewielkie możliwości mechanizacji (w porównaniu do nadźwiękowych wlotów prostokątnych w kolejnych generacjach) [Sobester, 2007]. W niektórych konstrukcjach z tego okresu (np. Lockheed F-104 Starfighter) stosowano również wloty boczne przy kadłubie jednak ich konstrucja była tożsama, gdyż składały się z dwóch symetrycznych wlotów w kształcie półokręgów z połówką stożka każdy. Ostatecznie wloty czołowe ze stożkiem odeszły do historii po wprowadzeniu

zaawansowanych systemów radarowych, które wymagały znacznie większej przestrzeni w kadłubie. Dwa charakterystyczne samoloty z tego okresu pokazano na rysunku 12.

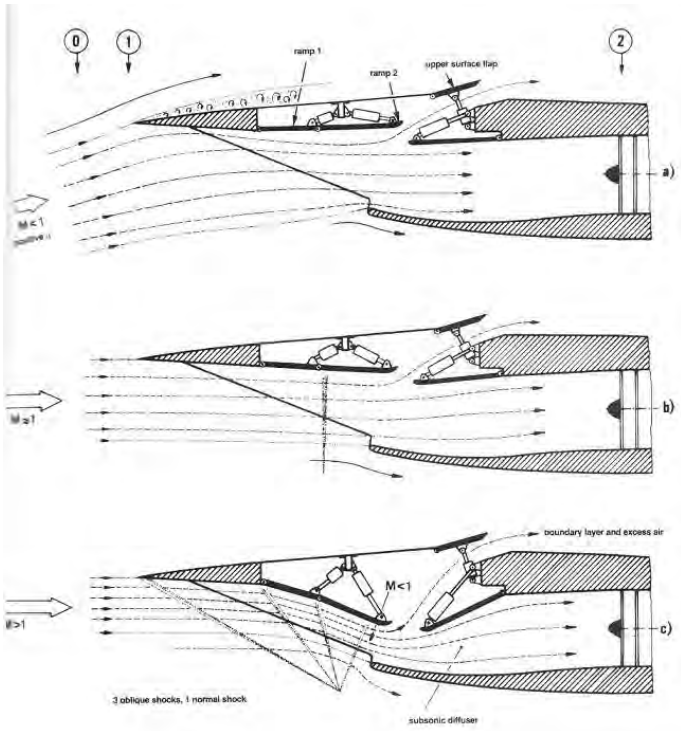


a) b)

Rys. 12. Konstrukcje myśliwców 2-giej generacji z wlotami czołowymi ze stożkeim (a) MiG-21 [flickr.com], b) Electric Lighting [reddit.com])

3.4. Układy wlotowe myśliwców 3-ciej generacji

Trzecia generacja myśliwców to dalszy wzrost maksymalnych prędkości lotu, które zaczęły osiągać liczbę Macha 2,0. Pierwsze konstrukcje nadal projektowano z mniejszym akcentem na manewrowowść i głównie koncentrowano się na osiąganiu większych prędkości i wysokości lotu. W wyniku tego układy wlotowe samolotów wymagały dostosowania do nowych warunków operacyjnych. Konstrukcje z tego okresu cechują przede wszystkim rozbudowane systemy mechanizacji wlotu, które dostosowywały jego geometrię do aktualnej liczby Macha. Celem było zachowanie korzystnego układu fal uderzeniowych i efektywne wyhamowanie strumienia w taki sposób aby zminimalizować straty ciśnienia. Wprowadzenie mechanizacji pozwalało również na budowę wlotów z wieloma falami uderzeniowymi (rysunek 11), co zapewniało niskie współczynniki strat ciśnienia. Dla wlotów naddźwiękowych, zasadniczo większa liczba skośnych fal uderzeniowych generowanych na jego powierzchni jest korzystniejsza pod względem parametrów i jednorodności strumienia, niż jedna prostopadła fala. Teoretyczny model tzw. wlotu izentropowego zakłada nieskończoną liczbę skośnych fal uderzeniowych. Równocześnie rozwój systemów awionicznych spowodował odejście od wlotów czołowych, więc naturalną decyzją było umieszczenie ich przy kadłubie.



Rys. 13. Regulowany naddźwiękowy układ wlotowy: a) ustawienie przy przepływie podźwiękowym, b) okołodźwiękowym, c) naddźwiękowym [Ozawa, 2018]

Typowy układ wlotowy z tego okresu składał się z płyty sprężającej, która w pierwszej części była stała, a w drugiej ruchoma. Cześć stała pełniła również rolę rozdzielacza strumienia (ang. diverter), który separował warstwę przyścienną kadłuba. Dla lotów z małymi prędkościami układ płyt pozostawał równoległy do przepływającego strumienia, natomiast przy prędkościach naddźwiękowych, siłowniki ustawiały ruchome płyty, które zapewniały odpowiedni układ fal uderzeniowych oraz tworzyły kanał rozbieżny zaraz przed wentylatorem silnika. Przykładowa mechanizacja wlotu tego typu została przedstawiona na rysunku 13.

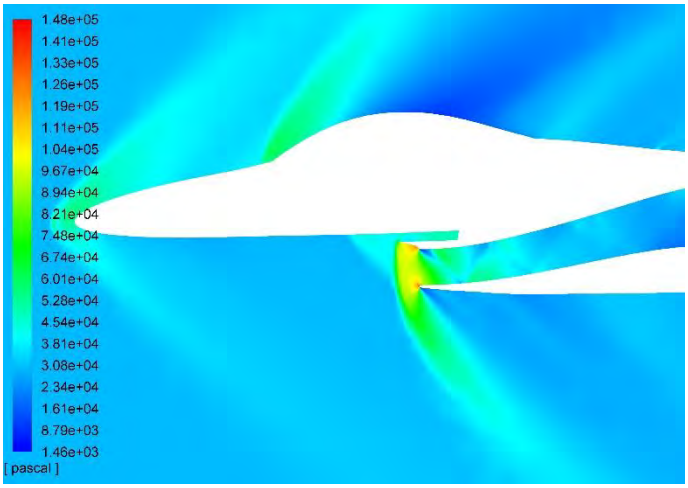
Dodatkowo zrezygnowano z przekroju kołowego wlotu na rzecz prostokątnego, który zapewniał bardziej zwartą budowę płatowca i mniejszy opór, oraz generował mniejsze zaburzenia przy zmianach kąta napływu strumienia. Wadą układów wlotowych tego typu była ich złożoność i zwiększona masa w wyniku wielu dodatkowych elementów strukturalnych i sterujących [Surber, Robinson, 1983]. Przykładowe konstrukcje wlotów z okresu wojny w Wietnamie przedstawiono na rysunku 14.

a) b)

Rys. 14. Konstrukcje myśliwców 3-giej generacji z wlotami przykadłubowymi z rozdzielaczem (a) MiG-23 [aereimilitari.org], b) McDonnell Douglas F-4 Phantom [military-watchmagazine.com])

3.5. Układy wlotowe myśliwców 4-tej generacji

Układy wlotowe myśliwców czwartej (oraz „czwartej plus") generacji są najbardziej różnorodne. Statki powietrzne tej klasy projektowano w koncepcji wielozadaniowych i wysokomanewrowych myśliwców. Pierwszym innowacyjnym układem opracowanym przez ówczesnych konstruktorów były wloty pracujące w warunkach prostopadłej fali uderzeniowej (ang. normal shockwave inlets). Wlot tego typu charakteryzuje się kształtem przekroju, który jest formą elipsy oraz stosunkowo krótkim kanałem dolotowym. Przykładową symulację przepływu, która obrazuje charakterystyczny układ fali uderzeniowej w tego typu wlocie przedstawiono na rysunku 15. U podstaw implementacji tego typu układu wlotowego leży jego efektywność pracy w dużym zakresie niskich liczb Macha (ok. 0,60-1,20), co czyni go dobrym wyborem dla lekkiego, wysokomanewrowego myśliwca. Dodatkową zaletą układu jest jego nieskomplikowana i lekka budowa. Przykładowo, zastosowanie tego typu wlotu w samolocie F-16 powodowało zmniejszenie masy o 250 funtów, dzięki czemu poprawiono charakteryski lotu, m.in. zmniejszono promień zakrętu o 7% przy liczbie Macha 1,20 [Hawkins, 1976].



Rys. 15. Rozkład ciśnienia statycznego w kanale dolotowym samolotu F-16 dla lotu z prędkością naddźwiękową

Co więcej, badania przeprowadzone przy projektowaniu samolotu F-16 wykazały, że wlot umieszczony pod kadłubem (ang. fuselage-shielded) cechuje się najlepszą stabilnością pracy i generuje namniejsze zaburzenia przy manewrowaniu, w bardzo szeroki zakresie liczb Macha. Powyżej lotów z liczbą Macha 1,6, lepsze parametry w tym zakresie posiadają wloty osłonięte skrzydłami (ang. wing-shielded). Z tych powodów wlot typu „normal shockwave" umieszczony centralnie pod kadłubem był idealnym wyborem dla wysokomanewrowego myśliwca wykonującego loty z liczbą Macha 0,60-1,20. Wadą tego typu układów jest duży opór aerodynamiczny oraz większe zaburzenia, generowane przy dużych prędkościach lotu. Wlot umieszczony pod kadłubem to również większa wrażliwość na jakość pasów startowych. W układach tego typu istnieje zwiększone ryzyko dostania się do silnika ciał obcych podczas kołowania, które mogą uszkodzić elementy wirników i wyłączyć samolot z eksploatacji [Surber, 1983]. Przykładowe samoloty z wlotami generującymi prostopadłą falę uderzeniową przedstawiono na rysunku 16.

a) b)

Rys. 16. Konstrukcje myśliwców 4-tej generacji z wlotami typu „normal shockwave” (a) Vought F-8 Crusader [crewdaily.com], b) General Dynamics F-16 Fighting Falcon [hesja.pl])

Wzrost znaczenia manewrowości miał również wpływ na konstrukcje myśliwców latających z większymi prędkościami (powyżej liczby Macha 2,0). Wzrost prędkości przekłada się bezpośrednio na konieczność wprowadzenia większego skomplikowania systemu wlotowego. Większa prędkość lotu to również bardziej znaczący wpływ warstwy przyściennej na działanie układu, która generuje większe zaburzenia przepływu jeśli zostaje zassana do kanału silnika. Zapewnienie wysokiej manewrowości oraz lotów z wysoce naddźwiękowymi prędkościacmi spowodowało, że powszechnie stosowano wloty prostokątne z mechanizacją z umiejscowieniem bocznym lub pod kadłubem. Stosowano w nich rozdzielacze, ruchome płyty sprężające, upusty (umieszczone najczęściej na górnej części wlotu), a wszystko podlegało skomplikowanym funkcjom sterowania. Zastosowanie przekroju prostokątnego powodowało poprawione charakterystyki pracy i ograniczone zaburzenia przy przepływie bocznym i dużych kątach natarcia. Wloty umieszczano bocznie (np. Panavia Tornado, F-15 Eagle), co pogarsza charakterystyki manewrowe wlotu na granicznych kątach natarcia ale pozostawia dodatkowe miejsce na uzbrojenie pod kadłubem samolotu. Drugim wariantem były wloty umieszczone pod kadłubem (np. MiG-29), które z kolei dawały lepsze charaketrystyki manewrowe lecz powodowały zwiększone ryzyko zassania ciał obcych z płyty lotniska. We wspomnianym MiG’u-29 ryzyko to ograniczono poprzez możliwość zamknięcia wlotów podczas kołowania (powietrze dostawało się wtedy do silnika od góry, przez zastępczy układ żaluzji). Oczywistą wadą tego typu układów jest ich znaczne skomplikowanie i masa [Surber, 1983]. Przykładowe myśliwce z wlotami tego typu przedstawiono na rysunku 17.

a) b)

Rys. 17. Konstrukcje myśliwców 4-tej generacji z wlotami prostokątnymi (a) Mig-29 [natemat.pl], b) McDonnell Douglas F-15 Strike Eagle [news-front.info])

W kolejnych latach obejmujących erę myśliwców czwartej generacji pojawiło się wiele układów wlotowych będących swoistą hybrydą już istniejących i zbadanych systemów. Przykładowo w szwedzkim samolocie SAAB JAS 39 Gripen zaprojektowano układ wlotowy boczny przykadłubowy z rozdzielaczem i płytą o skośnych krawędziach, którego prekursorem był F-4 z poprzedniej generacji. Z kolei produkowany przez europejskie konsorcjum Eurofighter Typhoon w konstrukcji układu wlotowego łączy zalety montowanych pod kadłubem układów typu „normal shockwave", które szczególnie dobrze pasują do wysokomanewrowych myśliwców, z przekrojem prostokątnym, płytami sprężającymi i mechanizacją przystosowaną do lotów wysokich prędkości. Innym przykładem wlotów będących hybrydą układów z poprzednich generacji samolotów bojowych może być francuski Dassault Rafale czy amerykański McDonnell Douglas F/A-18 Hornet. Układy wlotowe tych samolotów łączą w sobie kształt stosowany w wysokomanewrowych wlotach typu „normal shockwave", równocześnie stosując ich umieszczenie w kadłubie pomiędzy wariantem pod kadłubem, a wariantem bocznym. Dodatkowo w przypadku samolotu F/A-18 cofnięto wloty silnika chowając je pod skrzydłami. Przykładowe konstrukcje z tego okresu zaprezentowano na rysunku 18.

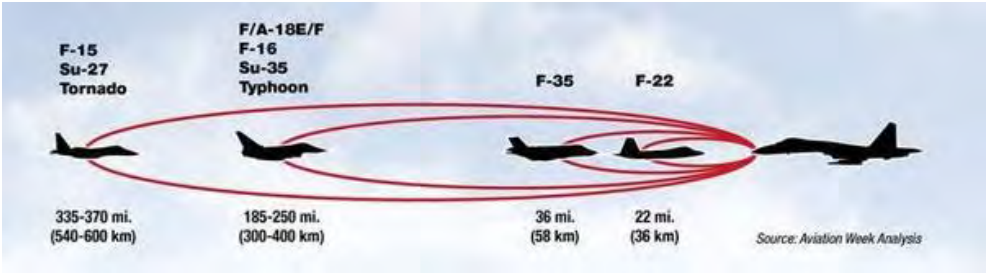
Rys. 18. Konstrukcje myśliwców 4-tej generacji z wlotami hybrydowymi (a) Saab JAS 39 Gripen [konflikty.pl], b) Eurofighter Typhoon [scramble.nl], c) Dassault Rafale [wnp.pl], d) McDonnell Douglas F/A-18 Hornet [defencemedianetwork.com])

3.6. Układy wlotowe myśliwców 5-tej generacji

Poza wysoką stabilnością pracy przy wykonywaniu ekstremalnych manewrów w szerokim zakresie prędkości oraz możliością wykonywania lotów z dużymi liczami Macha, wobec układów wlotowych myśliwców piątej generacji postawiono kolejne trudne zadanie. Wraz z wprowadzeniem technologii „stealth" niezwykle istotną kwestią stał się wpływ kształtu układu wlotowego na odbicie radarowe samolotu (ang. radar cross-section). W wyniku nowych wymagań zaistniała konieczność zwiększenia integracji wlotów silnika z kadłubem samolotu. Przykładowe wartości odległości z jakich możliwe jest wykrycie radarowe poszczególnych statków powietrznych pokazano na rysunku 19.

Pierwsze myśliwce piątej generacji korzystały z istniejących doświadczeń. Przykładowo dla samolotu Lockheed Martin F-22 Raptor zdecydowano się na wloty boczne o przekroju prostokątnym z rozdzielaczem, z tym, że umiejscowienie ich w kadłubie zaprojektowano tak aby nie zwiększały one odbicia radarowego samolotu. Z kolei w samolocie rosyjskiej produkcji Su-57 układ wlotowy jest podobny co do kształtu i przekroju jednak jego umiejscowienie w płatowcu przesunięto w kierunku

ogona w układzie osłoniętym skrzydłami (ang. wing-shielded). Przykładowe konstrukcje myśliwców piątej generacji zaprezentowano na rysunku 20.



Rys. 19. Odległości z jakich możliwe jest wykrycie radarowe myśliwców generacji 4, 4.5 oraz 5. [aviationweek.com]

a) b)

Rys. 20. Konstrukcje myśliwców 5-tej generacji (a) Lockheed Martin F-22 Raptor [newsmax.com], b) Su-57 [avtomanija.si])

Wciąż istotną nowością są zastosowane w najnowszych myśliwcach piątej generacji wloty typu DSI (ang. Diverterless Supersonic Inlets). Ich koncepcja została opracowana pierwotnie przez NASA i stała się głównym trendem w projektowaniu wlotów samolotów bojowych. Do czasu opracowania wlotów bez rozdzielacza, konstruktorzy podążali za trendem odsuwania krawędzi wlotu od kadłuba tak aby jak najmniejsza część warstwy przyściennej była wprowadzana do kanału dolotowego silnika. Oczywiście taki zabieg zawsze miał swój koszt w postaci zwiększonego oporu aerodynamicznego, który powstawał w wyniku zwiększenia przekroju poprzecznego sylwestki samolotu, a także koncentracji spiętrzonego strumienia w szczelnie między wlotem a kadłubem. Koncepcja wlotów DSI zakłada usunięcie rozdzielacza i zastosowanie

w jego miejscu wypukłej powierzchni. Geometria wlotu DSI jest zintegrowana z kadłubem samolotu i składa się z wypukłego obszaru przed wlotem i skośnej, wysuniętej krawędzi. Połączenie tych dwóch kształtów przekierowuje warstwę przyścienną strumienia poza kanał dolotowy silnika, co poprawia ogólne parametry wlotu, zmniejsza opór aerodynamiczny i zapewnia efektywne wyhamowanie strumienia z prędkości naddźwiękowej do poddźwiękowej przy zachowaniu niskich strat ciśnienia oraz wysokiej jednorodności i stabilności strumienia w szerokim zakresie warunków lotu. Poprawa powyższych parametrów wpływa również korzystnie na ogólne parametry całego zespołu napędowego. Co więcej, wloty powietrza ukształtowe w ten sposób zmniejszają odbicie radarowe obiektu, a eliminacja rozdzielacza zapewnia oszczędność masy układy do 30%. Wlot DSI został po raz pierwszy przetestowany w eksperymentalnej wersji samolotu F-16 Block 30 (rys. 21), a następnie po udowodnieniu słuszności koncepcji, wdrożony w samolocie Lockheed Martin F-35 Joint Fighter. Patent na to rozwiązanie został przyznany w 1998 roku [Hehs, 2000].

Rys. 21. Samolot F-16 w wersji Block 30 z wlotem typu DSI [f16.net]

Obecne prowadzone badania numeryczne i eksperymentalne potwierdzają najistotniejszą zaletę wlotów DSI, jaką jest ich szeroki zakres stabilnej pracy przy prędkościach lotu z liczbą Macha ok. 0,70 – 1,80 oraz kątach natarcia od 2 do 6 st. Mimo oczywistego występowania spadku parametrów pracy wlotu, w tym w szczególności współczynnika strat ciśnienia, zwiększonych zaburzeń strumienia dla prędkości naddźwiękowych i dużych kątów natarcia, zachowują one zadowalające parametry umożliwiające stabilną pracę [Afzal et. al. 2021]. Równocześnie prowadzone są już prace nad ulepszeniem istniejących wlotów DSI. Przykładem mogą być próby zastosowania wypukłej powierzchni przed wlotem, przy czym w pierwszych pracach wyeliminowano już możliwość zastosowania kształtu epileptycznego [Montes, Chanlder, 2019]. Przykładowe konstrukcje z wlotami typu DSI przedstawiono na rysunku 22.

a) b)

Rys. 22. Konstrukcje myśliwców 5-tej generacji z wlotami typu DSI (a) Lockheed Martin F-35 Joint Fighter [forsal.pl], b) J-20 [asiatimes.com])

3.7. Podsumowanie

Podstawowym zadaniem układu wlotowego jest wstępne sprężenie i przede wszystkim doprowadzenie odpowiedniej ilości, stabilnego, jednorodnego strumienia powietrza do sprężarki silnika. Wprowadzenie do lotnictwa silników turbinowych rozpoczęło nowy rozdział w rozwoju układów wlotowych, których projekty od tej pory musiały sprostać zupełnie nowym wymaganiom. W wyniku ewolucji tych wymagań powstawały i rozwijały się kolejne koncepcje w projektowaniu poszczególnych elementów układów wlotowych silników. Wraz z rozwojem technologii wprowadzano do konstrukcji zarówno nowe geometrie, kształty, a także zmieniano położenie wlotu w całym układzie aerodynamicznym jak i również wprowadzano elementy mechanizacji układu. Projektowanie układów wlotowych w lotnictwie wojskowym wiąże się z poszukiwaniem kompromisów między przeciwstawnymi parametrami, tak aby zapewnić jak najlepsze warunki statku powietrznego do realizacji powierzanych mu misji. Technolgoia układów wlotowych ewoluowała na bazie prowadzonych badań i zbieranych doświadczeń. Inżynierowie i konstruktorzy z każdym kolejnym statkiem powietrznym pozyskiwali nową wiedzę w tym obszarze. Czynnikiem znacząco przyśpieszającym rozwój projektowania tych elementów strukturalnych było wprowadzenie metod numerycznych w mechanice płynów. Możliwość szybkiego wykonywania złożonych symulacji i wizualizacji przepływu odkryła nowe możliwości w kształtowaniu geometrii wlotów. Projekty układów wlotowych stosowanych we współczesnych myśliwcach wynikają zarówno ze zmieniającej się taktytki walki powietrznej jak i gromadzonych przez lata doświadczeń i badań dotyczących pracy, parametrów, charakterystych poszczególnych projektów. Ich projekty są znacznie bardziej dopracowane i zaawansowane, a uzyskiwane parametry nieporównywalne z ich pierwotnymi wzorcami. Należy jednak pamiętać, że ich obecny kształ jest zoptymalizowany

pod kątem aktualnej taktyki walki powietrznej, która polega na zapewnieniu wysokiej manewrowości statku powietrznego i w przypadku pojawienia się nowych wymagań, zadaniem konstruktorów będzie dalsza praca i badanie nowych, ulepszonych układów wlotowych.

LITERATURA

Pozycje książkowe

1. Chambers J. R., 2000, Partners in Freedom. Contribution of the Langley Research Center to U.S. Military Aircraft of the 1900's, NASA, Waszyngton.
2. Goldsmith E. L., Seddon J., 1993, Practical Intake Aerodynamic Design, Blackwell Scientific Publications, Oxford.
3. Laurence J., Loftin K., 1985, Quest for Performance. The Evolution of Modern Aircraft, NASA, Waszyngton.
4. Ozawa, R., 2018, Structured Light-Field Focusing 3D Density Measurements of A Supersonic Cone, University of Central Florida.
5. Whitford R., 1987, Design for Air Combat, Jane's, Londyn.

Artykuły w czasopismach

1. Eurofighter World, 2010, What is a 5th generation fighter, Luty, s. 16.
2. Hallion P. R., 1990, A Troubling Past: Air Force Fighter Acquisition since 1945, Airpower Journal, Vol. IV, No. 4.
3. Hawkins J. E., 1976, YF-16 Inlet Design and Performance, Journal of Aircraft, Vol. 13, No. 6, pp. 436-441.
4. Hehs E., 2000, JSF Diverterless Supersonic Inlet, Code One Magazine, Vol. 15, No. 3.
5. Kozakiewicz A., Frant M., Majcher M., 2021, Impact of the Intake Vortex on the Stability of the Turbine Jest Engine Intake System, International Review of Aerospace Engineering, Vol. 14, N.4, August.
6. Kozakiewicz A., 2010, Turbinowe silniki odrzutowe jedno- i dwuprzepływowe w samolotach obojowych, Biuletyn WAT vol. LIX, nr 3(659), Warszawa.
7. Kozakiewicz A., 2009, Analiza porównawcza osiągów turbinowych silników odrzutowych samolotów bojowych obecnie użytkowanych w RP, Biuletyn WAT vol. LVIII, nr 2, Warszawa.
8. Martinic G., 2015, Jet fighter aircraft – five 'generations' later, and still counting, Australian Naval Institute, Kwiecień.
9. Sacks H. A., Spreiter R. J., 1951, Theoretical Investigation of Submerged Inlets at Low Speeds, National Advisory Committee for Aeronautics, Technical Note 2323.
10. Sobester A., 2007, Tradeoffs in Jet Inlet Design: A Historical Perspecitve, Journal of Aircraft, Vol. 44, No. 3, Maj-Czerwiec.
11. Zachos, P.K., Frascella M., MacManus D. G., Gil-Prieto D., 2017, Pressure Flowfield and Inlet Flow Distortion Metrics Reconstruction from Velocity Data, AIAA Journals, Volume 55, Issue 9.

Artykuły w materiałach konferencyjnych

1. Afzal A.A., Safdar M.M., Javed A., 2021, Performance analysis of a proposed design of diverterless su-personic inlet at various flight conditions, AIAA SciTech Forum.
2. Hunter Jr. L., Hawkins J, 1981, F-16 Variable-geometry inlet design and performance, AIAA Astronautics 17th Joint Propulsion Conference, Colorado Springs, Lipiec 27-29.
3. Kozakiewicz A., Wróblewski M., 2018, Potencjał techniczno-bojowy lotnictwa nowej generacji w aspekcie obronności państwa, Nasze Stulecie. Nauka dla obronności, Poznań.
4. Madelung O. G., 1978, Characteristics of Fighter Aircraft, AIAA Aircraft Systems and Technology Meeting, Seattle, Sierpień 22-24
5. Montes R.A., Chandler F.O., 2019, A CFD Investigation of a diverterless supersonic inlet of ellipsoidal entrance shape, AIAA Propulsion and Energy Forum.
6. Surber E.L., Robinson P.C., 1983, Survey of Inlet Development for Supersonic Tactical Aircraft, AIAA/SAE/ASME 19th Joint Propulsion Conference, Seattle, 27-29 Czerwca.
7. Whitford R., 1995, A Fighter Design Chronology, 1st AIAA Aircraft Engineering, Technology and Operations Congress, Los Angeles, 19-21 Września.

ACKNOWLEDGEMENTS

Praca została sfinansowana przez Wojskową Akademię Techniczną w ramach projektu nr UGB 781/2022

DIRECTIONS OF DEVELOPMENT OF INTAKE SYSTEMS IN COMBAT AIRCRAFT

Abstract

Intake system design is an extremely challenging task in any turbine-powered aircraft. The main challenge faced by designers is the complexity of the issue, which involves seeking compromises between opposing technical parameters that affect not only the flight characteristics of the aircraft but also many operational issues and limitations. This article presents how air intakes in combat aircraft have changed over the years, and how they look today. It presents and discusses the factors which influenced the shape of the intake systems and trends in their design in particular periods of jet fighters development.

Keywords: mechanical engineering, aviation, aircraft engines, intake systems, inlets.

Hasan AL-RIFAIE *
Piotr WOŹNIAK **
Tomasz ŁODYGOWSKI ***

IMPROVING THE BLAST RESISTANCE OF STEEL COLUMNS USING TRAPEZOIDAL SANDWICH PANELS

Among the weakest structural elements (to accidental or intentional explosions) are the columns of multi-storey buildings. Hence, the study proposes the use of sandwich panels as a protective technique for existing/new steel columns. A core of six cross-arranged, unconnected, graded, trapezoidal aluminum sheets was chosen. Two Protective Techniques (PT-1 and PT-2) have been designed based on the way the column is covered and the width of the sandwich panels. The numerical analyses were carried out using Abaqus/CAE and solved used Abaqus/Explicit solver. The results obtained from the comparative study confirm that sandwich panels can be an effective protection technique for steel columns. However, as the exposed area to the shock wave increase, the effectiveness of the solution decreases.

Keywords: sandwich panels, blast, steel columns, energy absorbers

1. INTRODUCTION

A blast-related impact in or directly near a building can cause a catastrophic damage to the external or internal structural frame of a building. Hence, this type of extreme loading is increasingly taken into account in the design process.

The column is the basic structural element transferring mainly compressive forces transmitted from other parts of the structure. Therefore, failure of such an element can cause partial or complete collapse of the structure [1]. There are many factors and variables that need to be considered when analyzing a structure such as construction material and the use of appropriate system that can respond efficiently to the applied loads [2-4].

* Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering and Transport, PUT
** Former Post-graduate student, Faculty of Civil Engineering and Transport, PUT
*** Professor, Faculty of Civil Engineering and Transport, PUT

In the UFC standard 3-40-02 [5], it is stated that beam elements and columns should be analyzed with respect to their behavior as a single element and as part of a structure. The calculation algorithms necessary for calculating the loads, the combinations of axial loads and bending moments are provided. The behavior of a steel column under explosive loading is a popular issue that has been studied by many researchers [4],[6-14]. The effect of explosion parameters, support conditions and column cross sections was studied by Momeni et al. [8]. Different FE models (solid and shell) were also checked and compared. Results showed that, in the case of pinned columns, the type of model had no influence on the column behavior. The situation changed when the supports were restrained, where the difference in the amount of deflections reached 35% [8].

Another important issue is the effect of axial force on a column subjected to blast load. The behavior of columns (with wide flange sections) subjected to blast load was studied by Lee et al. [11]. The study aimed to investigate the influence of the support conditions on the behavior and failure of the column. The conclusions show that the plastic deformation of a column with two restrained supports was concentrated in the middle and resulted in larger strain concentration [11]. The strength and stability of axially-loaded columns under blast load was analyzed by Nassr et al. [6]. The study concludes that the UFC manual overestimate the column capacity for ductility ratios and SDOF model is accurate in conjunction with the equivalent lateral load concept [6]. Figula et al. [10] compared the blast performance of a steel column, using analytical, numerical and field tests. Three ANFO charge weights; 2.3 kg (pipe bomb), 4.5 kg (bomb belt) and 9 kg (bomb waistcoat); were selected for the explosive charge scenarios. Two types of models were prepared which are the simplified (wire) 1D and refined (solid) 3D. Results revealed that the 3D model gave very similar strain and acceleration results to the experiment.

An extensive study was carried out by Nassr et al. [7]. Thirteen standard wide flange steel columns were used. Each was loaded with a force of 25% of the axial compression capacity. The explosive charges ranged in weight from 50 to 250 kg of ANFO. The standoff distance ranged from 1.0 to 10.3 m. The explosion parameters matched the conditions during the Murrah Building bombing in Oklahoma City in 1995. The results of loaded and unloaded columns were compared. The study concludes that if the steel columns are axially loaded to 25% of their axial capacity, then axial-deflection interaction (P-δ effect) can be neglected, provided that the column response remains in the elastic range. Otherwise, the interaction cannot be ignored [7].

Aikenhead and Chernin [13] looked at the effect of debris impact on a column after an explosion. They used the ConWEP tool of ABAQUS for the simulation. The material model was designed using the Johnson-Cook plasticity model. It was assumed that the generated shock waves act on a massive concrete masonry block, which is then shot towards the column, thus inducing an impact load [13]. The results obtained show that for different values of the explosive loads, the effect of the block impact on the axial compressive capacity of the column is less than 6%, i.e. negligible.

Many buildings, due to their use or for architectural reasons, have limitations in freely adopting geometrical solutions that would guarantee the load-bearing capacity of the structure against blast loads. Therefore, researchers are investigating different protective techniques to increase the resistance and to prevent the failure of structural elements [15]. A very versatile and widely used technique is the use of sandwich panels. Their function is to absorb the energy transmitted by a shock wave or a projectile. The geometry and material of the sandwich panel plays a major role in the energy dissipation. These can be divided into cellular core and corrugated core [16].

The most used composite panels in general construction have an interior filled with so-called soft core, i.e., polymeric foam or mineral wool. Their primary role is to form a closed barrier as a wall or roof finish. They are designed to withstand wind and snow loads and must meet insulation requirements. The explosion protection capabilities of those standard sandwich panels have been carried out by Studziński et al. [17]. The panels were fixed to steel beams using standard self-drilling fasteners. The field tests and simulations showed that the fasteners and the strength of the core are the key parameters [17]. The protective capabilities of the same panels to RC columns were studied by Vavilala et al. [18]. They analyzed the column of a multi-storey building using the Coupled Eulerian Lagrangian (CEL) method with the help of ABAQUS/Explicit software. The proposed protection technique significantly reduced displacements in the center of the column [18].

A more efficient solution in terms of blast absorption is the use of sandwich panels with cellular cores. Their main task is to absorb and evenly distribute the energy caused by the impact of a shock wave or a projectile while maintaining a relatively low mass [19]. The most used material to create metallic foams is aluminum. However, due to the geometric complexity of this type of structure, it is difficult to predict its behavior.

The cost and ease of fabrication of structural elements is a very important aspect when designing structures. Corrugated sandwich panels are very accessible, easy to manufacture and have a high load capacity due to their geometric parameters [20, 21]. The protective properties of corrugated panels were tested by Lin et al. [20]. By using trapezoidal panels, the displacement of the rear panel was reduced by up to 75%. The research work of Rong et al. [22] compared arc-shaped, sinusoidal, triangular, rectangular and trapezoidal core topologies. The first three topologies had the weakest bearing capacity parameters while the most effective solution was the trapezoidal core. The effect of using polyurea in the frontal layers of sandwich panels was investigated by Wang et al. [23]. The proposed solution made it possible to significantly improve the damping, mainly due to the viscoelastic energy dissipation through the polyurea layers [23]. A sandwich panel with Multilayer Modified Sinusoidal Corrugated (MSC) plates have been studied by Zhang et al. [24]. In panels with equal layers, a uniform deformation phenomenon was observed, which is similar to the plastic deformation of solid materials. The study concludes that a graded design of individual layers of core can lead to better energy absorption [24]. The orientation of internal layers was tested by Kılıçaslan et al. [25] using parallel layers (0/0) or perpendicular layers (0/90) to each

other. By using (0/90) orientation higher buckling stresses were obtained than the samples in (0/0) core orientation [25]. Al-Rifaie et al. [26] proposed and analyzed "A New Blast Absorbing Sandwich Panel with Unconnected Corrugated Layers". A multilayer sandwich panel with a core made of 6 cross-arranged, unconnected, graded, trapezoidal aluminum sheets was encased in a steel frame. Numerical analysis was then carried out using Abaqus/explicit solver. The panels were loaded using ConWEP tools and the results confirmed the effectiveness of the proposed solution [26].

It can be concluded from the reviewed literature that the use of aluminum sandwich panels as a blast protective system for steel columns has not yet been thoroughly investigated. A very efficient solution is the use of a core made of graded, unconnected layers of trapezoidal corrugated sheets. Efficiency, ease of production and flexible applicability are the main arguments for choosing this type of sandwich panel as a sacrificial protection technique. Hence, the aim of this study is to design a protective technique for improving the blast resistance of steel columns which in return may protect the infrastructure and the civilians from possible progressive collapse.

2. CASE STUDY AND NUMERICAL MODEL

Steel columns are main structural element in multi-storey buildings. Their dimensions depend on the role they play and the loads they carry. In this work, the geometric dimensions of the column were chosen based on the research of other scientists who reproduced the conditions during the attack on the Murrah Building in Oklahoma City [7]. The support conditions were adjusted to reflect the actual behavior of the element during the blast loading. They are the same in each case. The compressive force (N) was also taken from the literature [7]. The steel type S355 is commonly used in construction therefore it was chosen as the material for the column [30, 31]. Two Protective Techniques (PT-1 and PT-2) have been proposed based on the way the column is covered and the width of the sandwich panels. PT 1 assumed protection of the column only in the weaker axis, while PT-2 supposed to protect the column in both strong and weak axes. The dimensions were matched to the geometry of the column. A total of three types of sandwich panels with different widths were created. The material model of the sandwich panel was taken from the scientific work of Al-Rifaie [26]. The pressure due to explosion varies according to the proposed explosive mass W and the stanoff distance R. Three types of loading differing in TNT mass were considered. More details on the geometry, boundary conditions, material models and loads are described in the following sections.

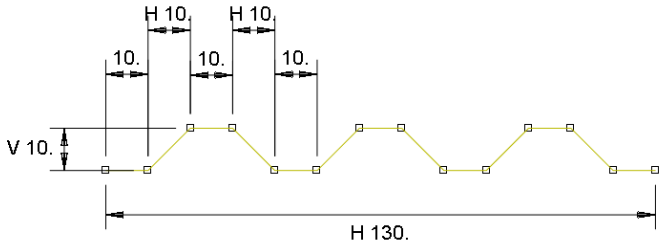
2.1 Steel column

The geometrical parameters of the steel column were chosen based on the scientific work of Nassr et al. [6]. In each case, column assumed to have W150x24 cross-section and height (length of the column) of 2413 mm.

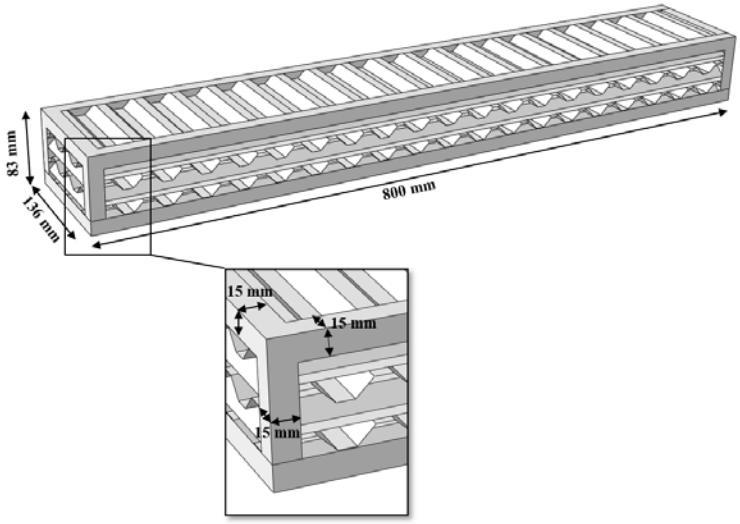
2.2 Sandwich panels

2.2.1 Protective Technique 1 (PT-1)

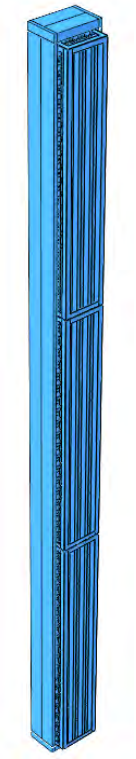
The dimensions of the sandwich panels were assumed to fit in the steel column required to be protected. Protective Technique 1 (PT-1) was intended to cover the weaker axis, so its width is 136 mm. The panel was positioned 6 mm from the web plane and 1.7 mm from the flanges. The geometry and assembly of this PT-1 is shown in Fig. 1.



a) Dimensions of aluminum trapezoidal sheet in direction of width



b) Exterior dimensions of the sandwich panel

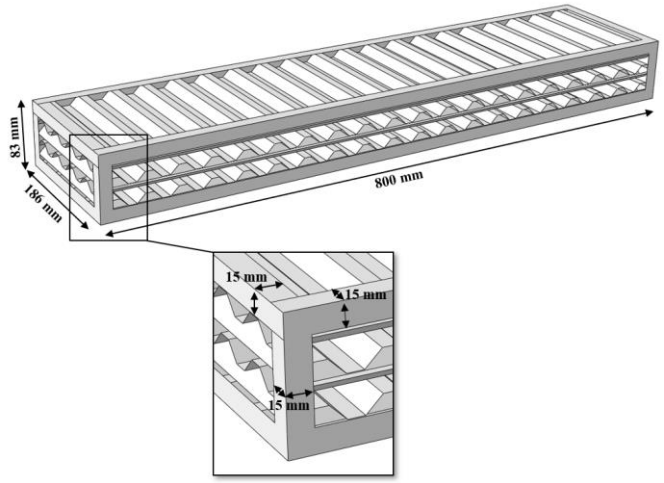


c) Assembly

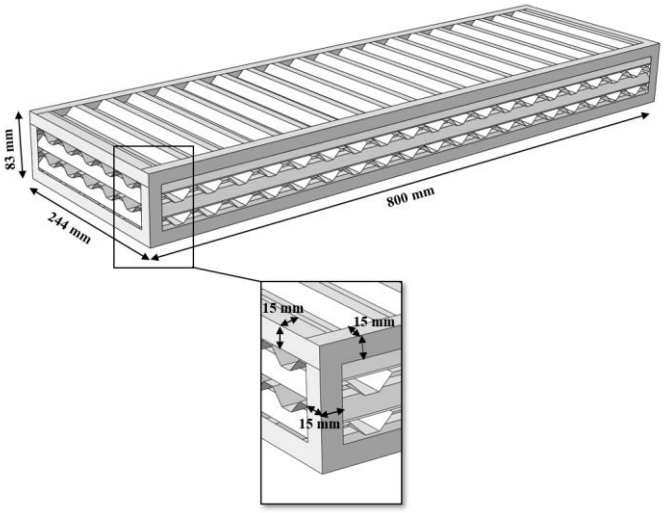
Fig. 1: Protective Technique PT-1

2.2.2 Protective Technique 2 (PT-2)

The second version was intended to cover the column. Hence, two types of sandwich panels with widths of 244 and 186 mm were used to suround the column. The panels were arranged in such a way that the lateral plane of the wider panel was equal to the front of the narrower panel. The spacing between all the panels and the column is 1 mm. The geometry and assembly of this PT-2 is shown in Fig. 2.



a) Exterior dimensions of the 1st sandwich panel



b) Exterior dimensions of the 2nd sandwich panel

c) Assembly

Fig. 2. Protective Technique PT-2

In both variants (PT-1 and PT-2) the protective solution consists of three 800 mm high panels that were enough to match the column height. The distance from the top and bottom supports is 6.5 mm. All types of sandwich panels are enclosed by a steel frame with edges 15 mm wide and 2 mm thick. The core of the panel is made up of 6 unconnected aluminum trapezoidal layers. Layers were cross-arranged (0/90). Thickness of each 2 susequent layers was assumed to be 1.5mm, 2.5mm and 3.5mm, respectively. This made a graded core that would enhance the energy absorption, as recommended in literature.

2.3 Boundary Conditions

The column is assumed to be fixed at the bottom support, with restraining all degrees of freedom. At the top support, only the column's translational degrees of freedom are restrained in the horizontal direction, while released in the vertical direction. The column's rotational degrees of freedom are all free. This allows possible compression of the column due to vertical applied load of the upper floors, or possible buckling due to blast shock wave. Fig.3 shows the boundary conditions applied to the upper and lower ends of steel column.

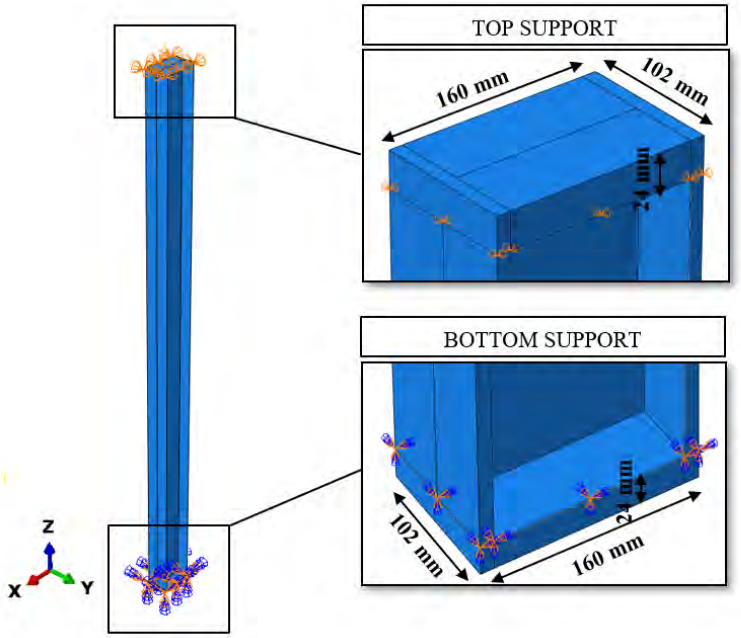


Fig. 3. Boundary conditions applied to the upper and lower ends of steel column

2.4 Numerical and material models

Abaqus and its explicit numerical solver were used to model and analyze the proposed solutions. A nonlinear dynamic explicit step had a total time of 0.006 s (6 ms). Seven homogeneous isotropic sections differing in thickness were created to represent the correct geometrical parameters of the model. The steel column consisted of three sections flange, web and end plates. The sandwich panels consisted of four sections, where three were assigned to the trapezoidal sheet layers and one to the sandwich panel steel frame. For the whole assembly, a general explicit contact was assigned with tangential and normal contact options. In tangential behaviour, the friction formulation was chosen a "Penalty" with friction coefficient = 0.3. Normal behavior was defined as "Hard" contact.

The S4 element type was used (which is four node doubly curved shell). A mesh analysis for the column (with 5, 10, 15, and 20mm mesh size) showed that the 20mm is the cost-effective choice. The more-accurate less-expensive mesh size for the sandwich panel was found to be 5mm which maintained sufficient accuracy. The assessment was based on the variation in the Plasic Dissipation Energy (PDE).

Due to the extreme nature of loading, the well-known Johnson-Cook material model was used to account for elasticity, plasticity, strain hardening and damage initiation. The steel column was made of S355 steel with elastic and plastic states described by the J-C model [30] and the damage parameters by the damage for ductile metals [31]. The sandwich panel's steel frame was made of Weldox 460E Steel and the trapezoidal corrugated inner layers are created from AL6063-T4 aluminum. To add the effect of heat generated from plastic strains, the "Adiabatic heating effects" were also included, assuming inelastic heat fraction χ= 0.9. The material parameters are presented in Table 1.

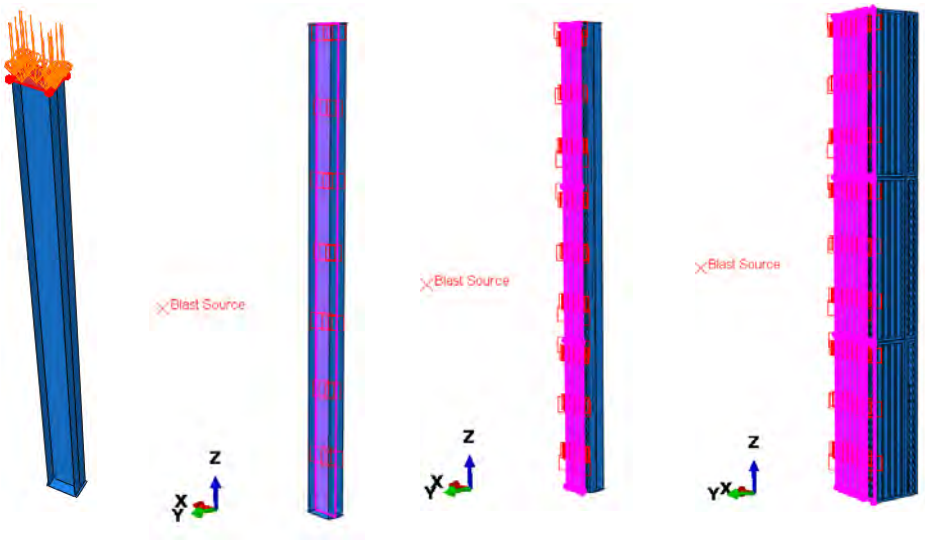
Table 1
Material parameters for Weldox 460E Steel [16], AL6063-T4 aluminum [16] and S355 Steel [31], used for sandwich panel's frame, corrugated core and column, respectively.

Category	Constant	Description	Unit	Weldox 460E Steel	AL6063-T4 Aluminum	S355 Steel
Elastic Constants	E	Modulus of Elasticity	GPa	200	68.9	210
	ν	Poisson's ratio	-	0.33	0.33	0.3
Density	ρ	Mass density	kg/m^2	7850	2703	7850
	A	Yield Strength	MPa	490	89.6	448

Yield stress and strain hardening	B	Ultimate Strength	MPa	807	172	782
	N	Work-hardening exponent	-	0.73	0.42	0.562
Strain-rate hardening	$\dot{\varepsilon_0}$	Reference Strain rate	S^{-1}	$5x10^{-4}$	$1x10^{-4}$	1
	C	Strain rate factor	-	0.0114	0.002	0.0247
Damage evolution	ω	Damage parameter	-	1	1	1
Adiabatic heating and temperature softening	C_p	Specific heat	$mm^2 \cdot K/S^2$	$452x10^6$	$910x10^6$	$486 x10^6$
	χ	Inelastic heat fraction	-	0.9	0.9	0.9
	T_m	Melting Temperature	K	1800	616	1538
	T_0	Room Temperature	K	293	293.2	300
	m	Thermal-softening exponent	-	0.94	1.34	1
Fracture Strain Constants	d_1	-	-	0.0705	-0.77	-
	d_2	-	-	1.732	1.45	-
	d_3	-	-	-0.54	0.47	-
	d_4	-	-	-0.015	0.00314	-
	d_5	-	-	0	1.6	-
Ductile damage	$\bar{\varepsilon}_0^{pl}$	Fracture Strain	-	-	-	0.18
	η	Stress Triaxiality	-	-	-	0.333

2.5 Loading

The main purpose of a steel column is to carry compressive loads. In the present study, the geometry and axial load proposed in the work of Nassr et al. [7] were used. The steel column was loaded with a compressive force N of 270 kN, which is equivalent to an applied pressure of 16.544 MPa to the plate on the top support. In terms of blast loading, the mass (W) and standoff distance (R) are main parameters to consider. The angle of incident was assumed as 0°, which returns maximum possible peak reflected overpressure. The blast loads were modelled using the ConWEP function of ABAQUS (surface blast option). The standoff distance (R) was kept contstant at 1m while the mass W was modified as (1 kg, 5 kg and 17.5 kg of TNT). The weaker axis of the column was considered as it is the most vulnerable direction. It is important to mention that the standoff distance (R) was always measured from the center of the explosive object to the web of the column. The loading conditions are presented in Fig. 4. The 3 cases considered in this study are illustrated in Fig. 5.



Vertical Pressure | Column | Column with PT-1 | Column with PT-2

Fig. 4. Loading conditions

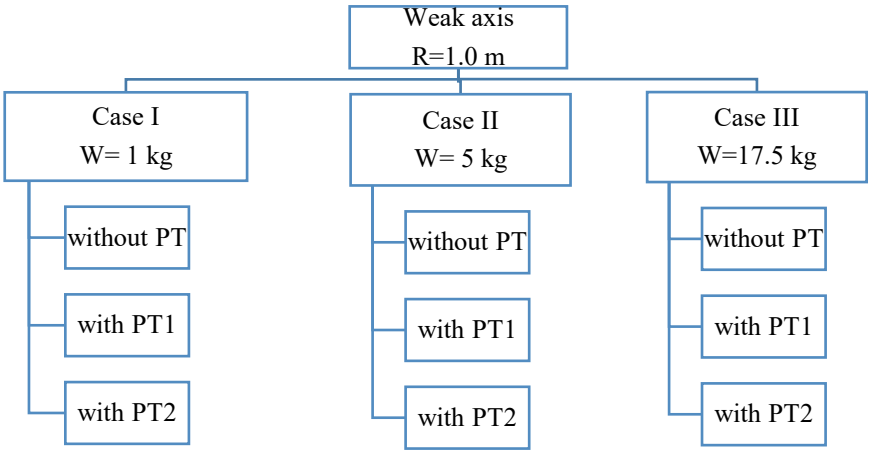


Fig. 5. The cases considered in this study

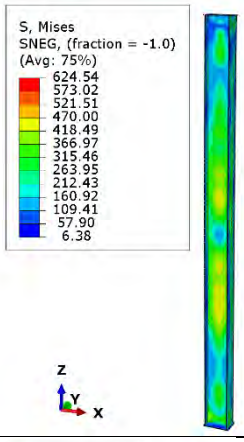
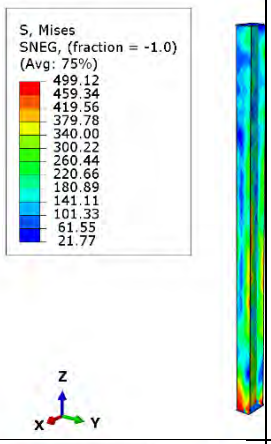
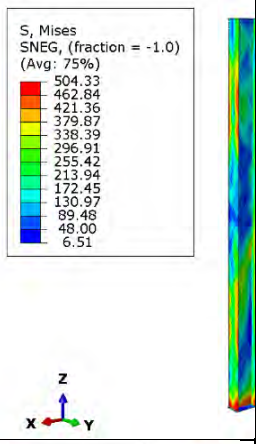
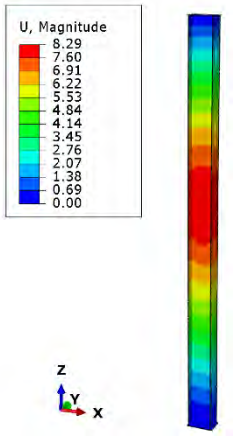
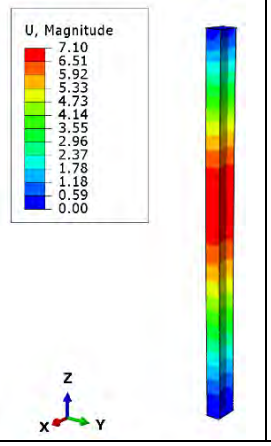
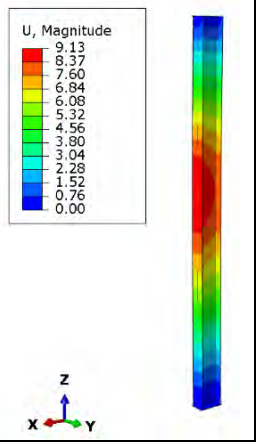
3. RESULTS AND DISCUSSION

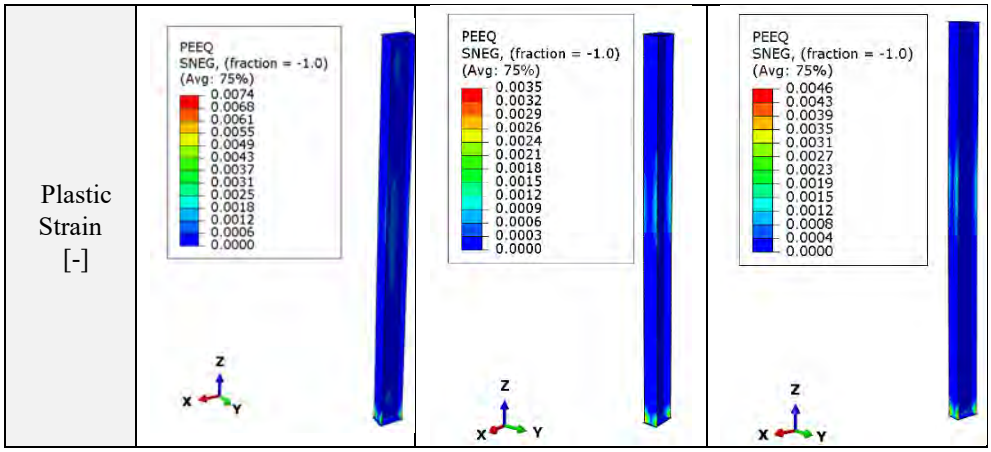
3.1 Case I (W=1kg of TNT, R=1m)

The results of Mises stress, displacement and the equivalent plastic strain in the steel column are shown in Table 2. Thanks to the use of PT-1, the value of Mises Stress, Displacement, Equivalent Plastic Strain was respectively lower by 20.08%, 14.35% and 52.70%, in relation to sample without protective technique. For PT-2, the value of Mises Stress and Equivalent Plastic Strain are lower by 19.25% and 37.84, respectively, while the displacement is higher by 9.20%.

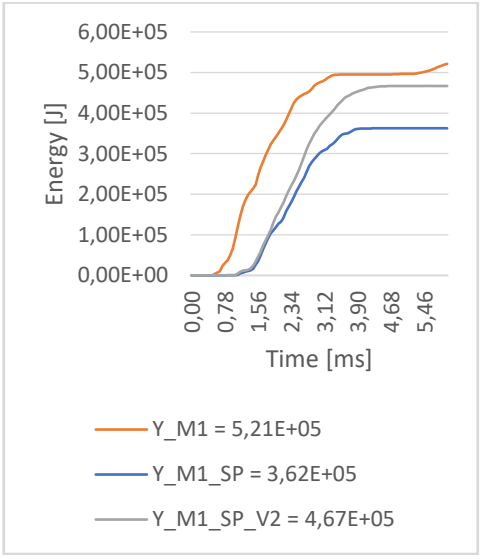
Table 2

Comparison of Mises stress, displacement and equivalent plastic strain in the steel column with and without the protective techniques (for Case I)

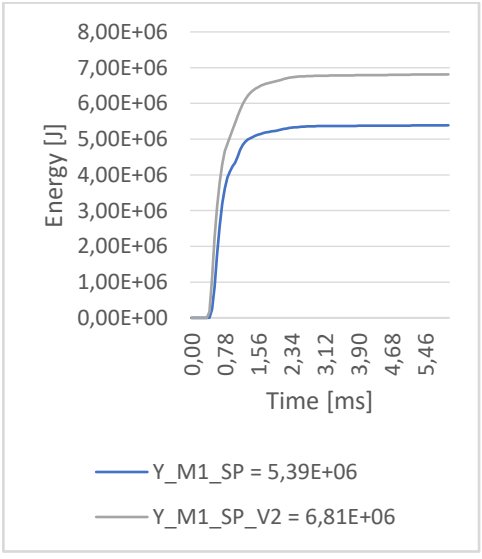
	Column	Column+PT-1	Column+PT-2
Mises Stress [MPa]			
Disp. [mm]			



The results of Plastic Dissipation Energy (PDE) in column are shown in Fig.6. By using PT-1, the value of PDE was reduced by 30.52% in relation to sample without protective technique. PT-2 was less effective, with a value lower by 10.36%. Using PT-2 showed a higher value of PDE by 26.35% compared to PT-1.



PDE in the steel column



PDE in the panels

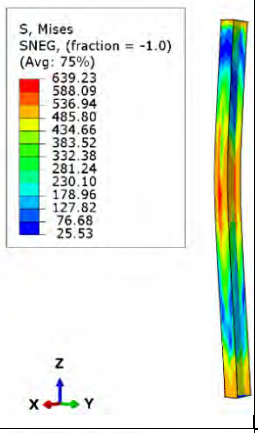
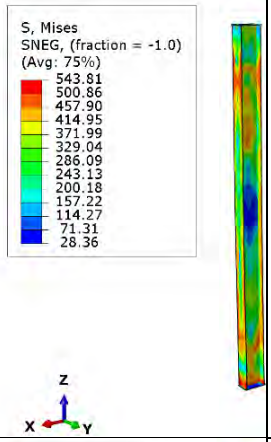
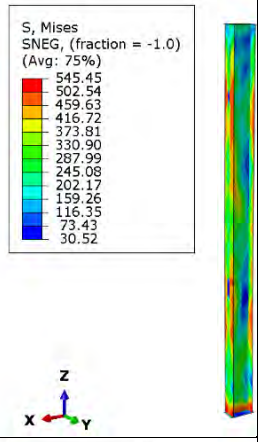
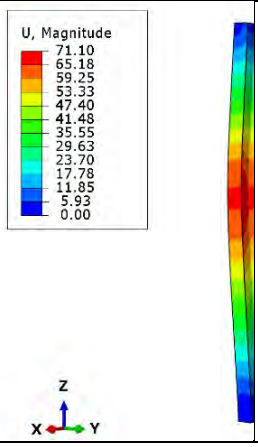
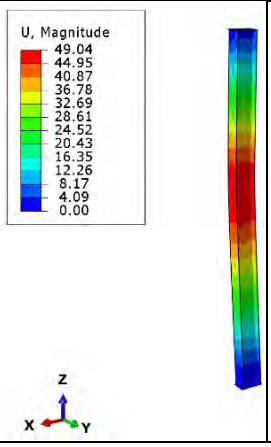
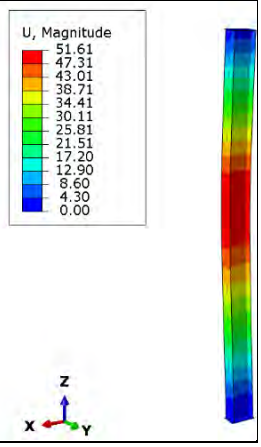
Fig. 6. Comparison of the PDE for case I

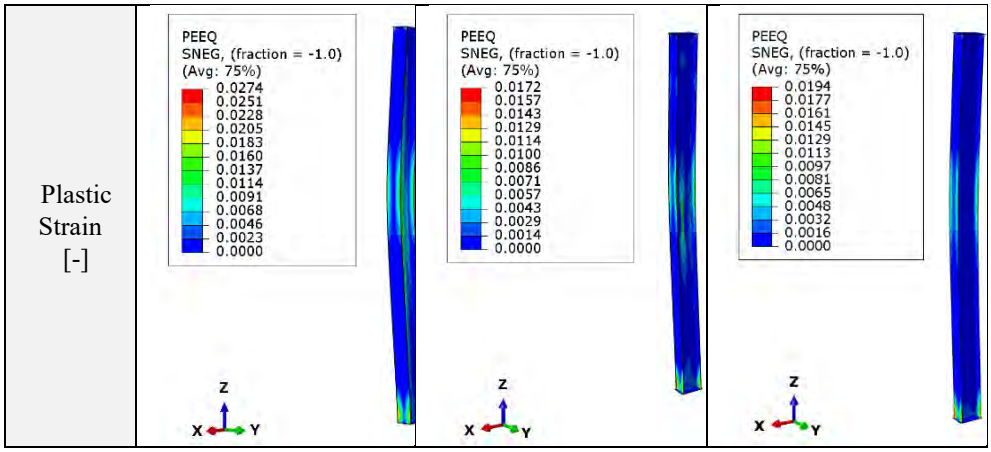
3.2 Case II (W=5kg of TNT, R=1m)

The results of Mises Stress, displacement and the equivalent plastic strain in the steel column are shown in Table 3. With PT-1, the value of Mises Stress, Displacement, Equivalent Plastic Strain was respectively lower by 14.93%, 31.03% and 37.23% compared to the column without protective technique. Similar results were obtained for PT-2. The value of Mises stress, displacement and equivalent plastic strain was lower by 14.67%, 27.41%, 29.20%, respectively.

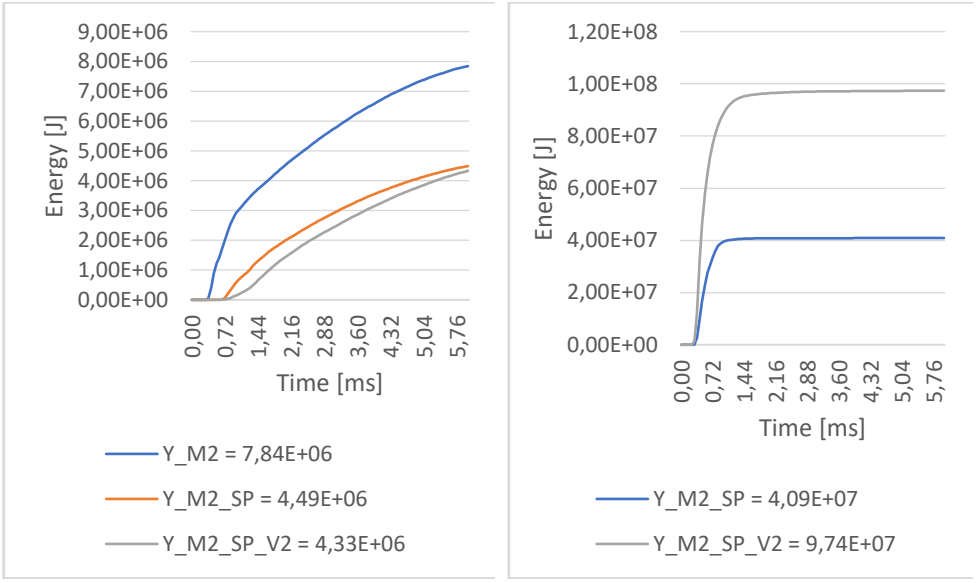
Table 3

Comparison of Mises stress, displacement and equivalent plastic strain in the steel column with and without the protective techniques (for Case II)

	Column	Column+PT-1	Column+PT-2
Mises Stress [MPa]			
Disp. [mm]			



The results of Plastic Dissipation Energy (PDE) in the steel column are shown in Fig. 7. By using PT-1, the value of PDE was reduced by 42.73% compared to the column without protective technique. PT-2, in this case, was more effective, with a value lower by 44.77%. PT-1 showed a higher value of PDE by 138.14% compared to PT-2.



PDE in the steel column PDE in the panels

Fig. 7. Comparison of the PDE for case II

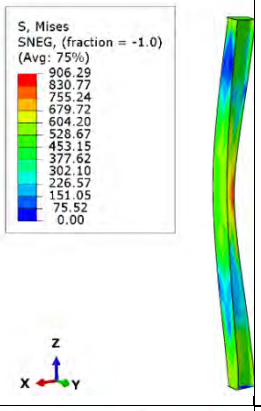
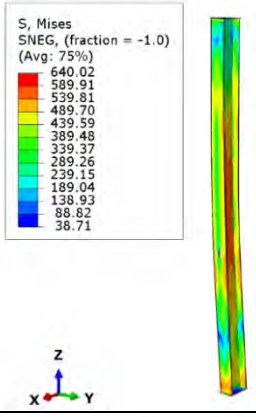
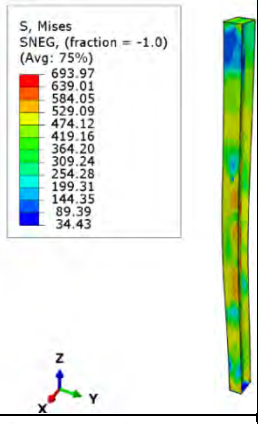
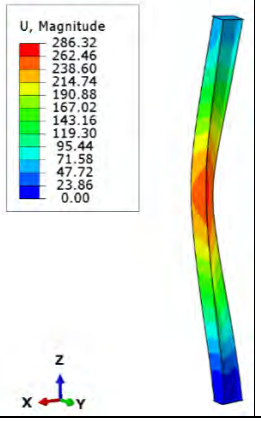
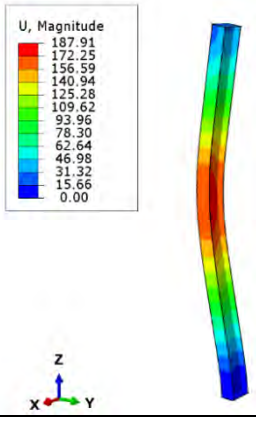
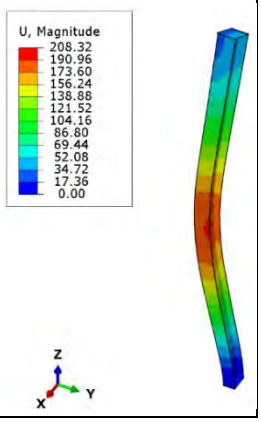
3.3 Case III (W=17.5kg of TNT, R=1m)

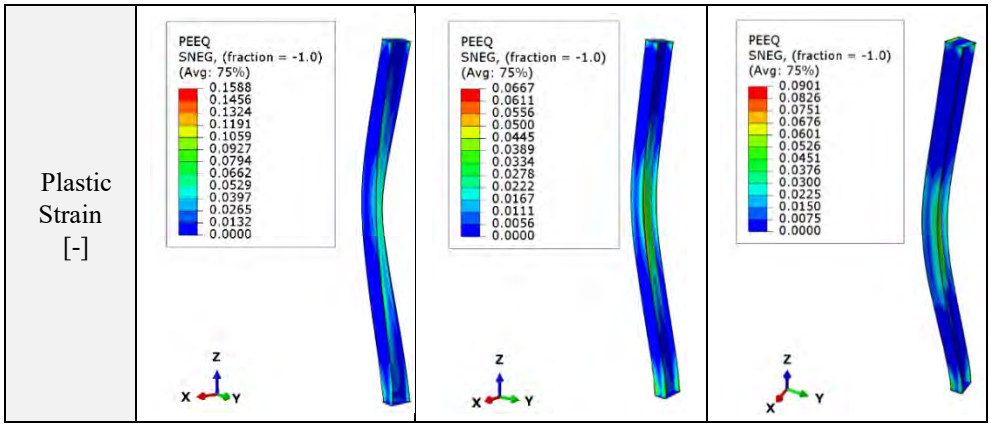
The results of Mises stress, displacement and equivalent plastic strain in the column are shown in Table 4. Using PT-1, the peak values of Mises stress, displacement, and equivalent plastic strain were respectively lower by 29.38%, 34.37% and 58.00% compared to the column behaviour without protective technique. Similar results were obtained for PT-2. The values of Mises stress, displacement and equivalent plastic strain were lower by 23.43%, 20.19% and 43.26%, respectively.

It was observed that due to extreme blast load in this case (with 17.5 kg of TNT) the PT-2 was completely destroyed which led to the formation of debris. On the other hand, in the column with PT-1, the aluminum layers were moved in opposite direction to the path of the blast wave. This phenomenon was due to the negative phase of blast wave, where suction may occur.

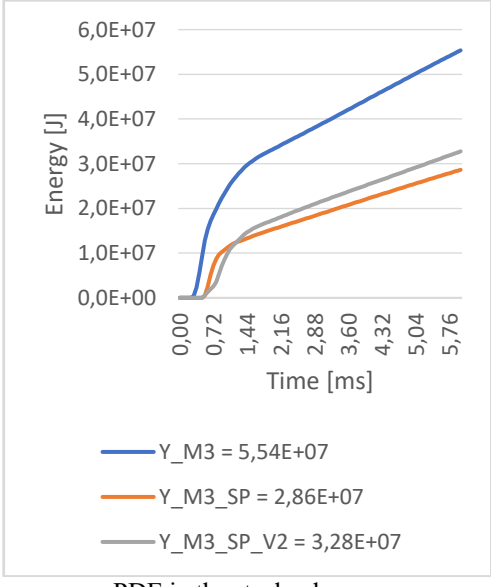
Table 4

Comparison of Mises stress, displacement and equivalent plastic strain in the steel column with and without the protective techniques (for Case III)

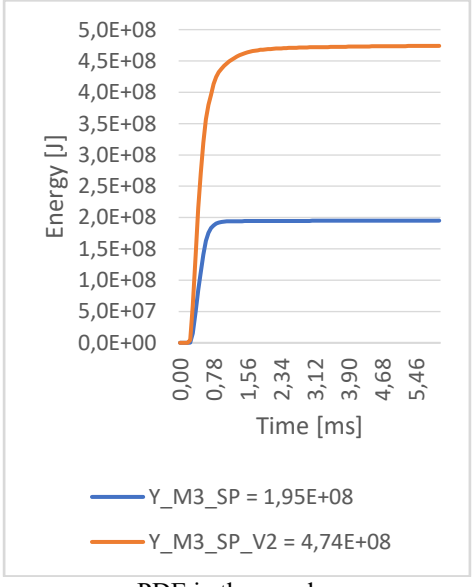
	Column	Column+PT-1	Column+PT-2
Mises Stress [MPa]			
Disp. [mm]			



The results of Plastic Dissipation Energy (PDE) in column are shown in Fig. 8. By using PT-1, the value of PDE was reduced by 48.38% compared to the column without protective technique. PT-2 was less effective, with a value lower by 40.79%. The results of PDE in sandwich panels showed that PT-2 has higher value of PDE by 143.08% compared to PT-1.



PDE in the steel column



PDE in the panels

Fig. 8. Comparison of the PDE for case III

4. CONCLUSIONS

The aim of this study was to design a protective technique for improving the blast resistance of existing/new steel columns. Sandwich panels were chosen as a protective technique. It was decided to use a multilayer sandwich panel with a core made of 6 cross-arranged, unconnected, graded, trapezoidal aluminum sheets enclosed in a steel frame. Mises Stress (S), Displacements (U), Equivalent Plastic Strain (PEEQ) and Plastic Dissipation Energy (PDE), were the main examined parameters.

The Protective Technique PT-1 revealed very good results in terms of limiting the impact of the explosion on the column. By using proposed sandwich panels, it was possible to prevent the appearance of damage to the column. Due to the fact that the sandwich panels are placed between the flanges, they are almost completely hidden in the column, which could be important from the architectural point of view. Hence, under blast loading, the shape of the column can trap any resulting debris, which can be an additional protection to surrounding non-structural elements or people. It can also be relatively easy to install this type of solution.

In contrast, PT-2 showed less desired performance. This may be related to the larger surface on which the wave impact occurs. Although sandwich panels absorb a significant part of the energy from the explosion, it does not compensate for the growing amount of energy resulting from a larger surface. This solution may also brings further problems, such as torsional buckling, increased column size (architectural design), the need to produce two types of sandwich panels, more complicated assembly and the risk of creating a large amount of debris during extreme loading scenarios. Hence, PT-2 was therefore considered to be less effective.

In conclusion, the use of sandwich panels with a core of 6 cross-arranged, unconnected, graded, trapezoidal aluminum sheets can be an effective protective technique for steel columns. However, through the analysis carried out in this study, it can be concluded that the effectiveness of this solution is closely related to how the sandwich panels are applied on the column. A very important aspect that must be taken into account during designing similar solutions is the fact that with increasing surface area on which the shock wave occurs, the efficiency of the solution decreases. Another issue is the possibility of debris in extreme situations. To sum up, sandwich panels as a protective technique on steel columns is a topic that worths further investigations.

ACKNOWLEDGEMENTS

Partial financial support was received from the Ministry of Science and Higher Education, Poland, grant number 0411/SBAD/0004.

BIBLIOGRAPHY

1 H. Al-Rifaie & Sumelka, W. (2020). Improving the blast resistance of large steel gates—numerical study. Materials, 13(9), 2121.
2 H. Al-Rifaie & D. Mohammed (2022). Comparative Assessment of Commonly Used Concrete Damage Plasticity Material Parameters. Engineering Transactions.
3 Sielicki, P. W., Łodygowski, T., Al-Rifaie, H., & Sumelka, W. (2017). Designing of blast resistant lightweight elevation system-numerical study. Procedia Engineering, 172, 991-998.
4 H. Al-Thairy; "A modified single degree of freedom method for the analysis of building steel columns subjected to explosion induced blast load"; International Journal of Impact Engineering 94 (2016) 120–133.
5 US DoD (US Department of Defence), United Facilities Criteria UFC 3-340-02, Structures to resist the effects of accidental explosions. Washington DC, USA: US Government Printing Office, 2008.
6 A. Nassr, A. G. Razaqpur, M. J. Tait, M. Campidelli, S. Fo; „Strength and stability of steel beam columns under blast load"; International Journal of Impact Engineering 55 (2013) 34-48.
7 A. Nassr, A. G. Razaqpur, M. J. Tait, M. Campidelli, S. Foo; "Dynamic response of steel columns subjected to blast loading"; Journal of Structural Engineering, vol. 140, no. 7, p. 04014036, 2014.
8 M. Momeni, M. Ali Hadianfard, C. Bedon, A. Baghlani; "Numerical damage evaluation assessment of blast loaded steel columns with similar section properties"; Structures 20 (2019) 189-203.
9 L. Chernin, M. Vilnay, I. Shufrin; "Blast dynamics of beam-columns via analytical approach"; International Journal of Mechanical Sciences 106 (2016) 331–345.
10 L. Figuli, C. Bedon, Z. Zvaková, Š. Jangl, V. Kavický; "Dynamic analysis of a blast loaded steel structure"; Procedia Engineering 199 (2017) 2463–2469.
11 K. Lee, T. Kim, J. Kim; "Local response of W-shaped steel columns under blast loading"; Structural Engineering and Mechanics, Vol. 31, No. 1 (2009) 25-38.
12 L. Mazurkiewicz, J. Malachowski, P. Baranowski; "Blast loading influence on load carrying capacity of I-column"; Engineering Structures 104 (2015) 107–115.
13 L. Chernin, K. Aikenhead; "Effect of debris impact on post-blast response of steel columns"; Conference Paper September 2018.
14 H. Al-Thairy; "Behaviour and Failure of Steel Columns Subjected to Blast Loads: Numerical Study and Analytical Approach"; Hindawi Advances in Materials Science and Engineering Volume 2018, Article ID 1591384, 20 pages.
15 R. Alberdi, J. Przywara, K. Khandelwal; "Performance Evaluation of Sandwich Panel Systems for Blast Mitigation"; Eng. Struct.2013, 56, 2119–2130.
16 H. Al-Rifaie; „Application of passive damping systems in blast resistance gates"; Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2019
17 R. Studziński, T. Gajewski, M. Malendowski, W. Sumelka, H. Al-Rifaie, P. Peksa, P.W. Sielicki; "Blast Test and Failure Mechanisms of Soft-Core Sandwich Panels for Storage Halls Applications"; Materials 2021, 14, 70.
18 S. Vavilala, P. Shirbhate, J. Mandal, M. D. Goel; "Blast mitigation of RC column using polymeric foam"; Materials Today: Proceedings 26 (2020) 1347–1351.

19 N. Novak, L. Starcevic, M. Vesenjak, Z. Ren; “Blast Response Study of the Sandwich Composite Panels with 3D Chiral Auxetic Core”; Compos. Struct. 2019, 210, 167–178.
20 X. Li, Z. Wang, F. Zhu, G. Wu, L. Zhao; „Response of aluminium corrugated sandwich panels under air blast loadings: Experiment and numerical simulation”; International Journal of Impact Engineering 65 (2014) 79-88.
21 P. Zhang, J. Liu, Y.S. Cheng, H. Hou, C. Wang, Y. Li; “Dynamic Response of Metallic Trapezoidal Corrugated-Core Sandwich Panels Subjected to Air Blast Loading–An Experimental Study”; Mater. Des. 2015, 65, 221–230.
22 Y. Rong, J. Liu, W. Luo, W. He; “Effects of Geometric Configurations of Corrugated Cores on the Local Impact and Planar Compression of Sandwich Panels”: Compos. Part B: Eng. 2018, 152, 324–335.
23 X. Wang, X. Li, R.P. Yu, J.W. Ren, Q.C. Zhang, Z.Y. Zhao, C.Y. Ni, B. Han, T. J. Lu; “Enhanced vibration and damping characteristics of novel corrugated sandwich panels with polyurea-metal laminate face sheets”; Composite Structures 251 (2020) 112591.
24 Z. Zhang, H. Lei, M. Xu, J. Hua, C. Li, D. Fang; “Out-of-Plane Compressive Performance and Energy Absorption of Multi-Layer Graded Sinusoidal Corrugated Sandwich Panels”; Mater. Des. 2019, 178, 107858.
25 Kılıçaslan, M. Güden, ˙I.K. Odacı, A. Ta¸sdemirci; “Experimental and Numerical Studies on the Quasi-Static and Dynamic Crushing Responses of Multi-Layer Trapezoidal Aluminum Corrugated Sandwiches”; Thin-Walled Struct. 2014, 78, 70–78.
26 H. Al-Rifaie, R. Studzinski, T. Gajewski , M. Malendowski, W. Sumelka, P. W. Sielicki; „A New Blast Absorbing Sandwich Panel with Unconnected Corrugated Layers—Numerical Study”; Energies 2021, 14, 214.
27 Dassault Systèmes, "ABAQUS documentation collection," 2013.
28 Dassault Systèmes, CONWEP charge for incident waves, ABAQUS documentation collection, 2016.
29 P. Mamrak; “Pressure evolution inside complex corridor system induced by blast action”; Poznan University of Technology Faculty of Civil and Environmental Engineering, Poznań 2011.
30 Forni, B. Chiaia, E. Cadoni; „Mechanical properties of S355 under extreme coupled effect of high temperatures and high strain rates”; Department of Structural, Geotechnical and Building Engineering, Politecnico di Torino, Torino, Italy.
31 F. Yang, M. Veljkovic, Y. Liu; “Ductile damage model calibration for high-strength structural steels”; Construction and Building Materials Volume 263, 10 December 2020, 120632.

POPRAWA ODPORNOŚCI NA WYBIJANIE SŁUPÓW STALOWYCH Z WYKORZYSTANIEM WARSTWOWYCH PŁYT TRAPEZOWYCH

Streszczenie

Do najsłabszych elementów konstrukcyjnych (do przypadkowych lub celowych wybuchów) należą kolumny budynków wielokondygnacyjnych. W związku z tym badanie proponuje zastosowanie płyt warstwowych jako techniki ochronnej dla istniejących/nowych słupów stalowych. Wybrano rdzeń złożony z sześciu ułożonych krzyżowo, niepołączonych, stopniowanych, trapezowych blach aluminiowych. Dwie Techniki Ochronne (PT-1 i PT-2) zostały zaprojektowane w oparciu o sposób pokrycia słupa i szerokość płyt warstwowych. Analizy numeryczne przeprowadzono przy użyciu Abaqus/CAE i rozwiązano przy użyciu solwera Abaqus/Explicit. Wyniki uzyskane z badań porównawczych potwierdzają, że płyty warstwowe mogą być skuteczną techniką ochrony słupów stalowych. Jednak wraz ze wzrostem powierzchni wystawionej na działanie fali uderzeniowej skuteczność rozwiązania maleje.

Słowa kluczowe: płyty warstwowe, piaskowanie, słupy stalowe, pochłaniacze energii

Łukasz BRODZIK *

ANALIZA SAMOLOTÓW MYŚLIWSKICH NA PODSTAWIE WYBRANYCH PARAMETRÓW

W artykule przedstawiono analizę porównawczą parametrów samolotów myśliwskich z napędem turboodrzutowym. Pod uwagę wzięto masy samolotów, obciążenie płata, ciągi oraz osiągane prędkości. Przedstawiono, jak te parametry zmieniały się na przełomie wielu lat, od początków pierwszych samolotów z napędem turboodrzutowym do czasów współczesnych. Na tej podstawie otrzymano funkcje trendów, których kształt zaprezentowano na załączonych wykresach.

Słowa kluczowe: mechanika lotu, aerodynamika

1. WPROWADZENIE

Ideę samolotu myśliwskiego zaczęto wprowadzać w czasie I wojny światowej. Od tego czasu wiele się zmieniło. Samoloty dwupłatowe osiągały wysokość ok 4200 m w czasie 25 minut. F-15 osiągał ponad 15000 m w minutę. Warto pamiętać, że współczesny samolot myśliwski ma również znacznie szersze możliwości bojowe. Pierwotnie myśliwce miały w dużej mierze zadania zwiadowcze. Obecnie taki samolot określany jest mianem samolotu wielozadaniowego. Pierwsze turboodrzutowe samoloty myśliwskie powstały w okresie II wojny światowej. Zapoczątkowały one nową erę osiągów samolotów bojowych. W latach 50-tych i 60-tych nastąpiło dwukrotne podwojenie maksymalnych prędkości tych samolotów. Do rozwoju tego typu samolotów przyczyniło się z pewnością kilka istotnych wydarzeń historycznych, m.in. II wojna światowa 1939-1945 r. (pierwsze konstrukcje samolotów turboodrzutowych), wojna w Korei 1950-1953 r. (pierwsze istotne sprawdziany bojowe samolotów turboodrzutowych), wojna w Wietnamie 1960-1975 r. oraz okres tzw. zimnej wojny. Celem artykułu jest określenie funkcji trendu wybranych parametrów samolotów myśliwskich

* Zakład Inżynierii Lotniczej, Politechnika Poznańska

wyposażonych w napęd turboodrzutowy. Dokładna analiza tych samolotów dotyczyłaby wielu obszarów i wykraczałaby poza jeden artykuł dlatego w kolejnym rozdziale uszegółowiono zakres porównywanych parametrów.

2. PRZYGOTOWANIE DO ANALIZY

W analizie skoncentrowano się na następujących parametrach: iloraz masy minimalnej i maksymalnej samolotu, maksymalna liczba Macha w locie poziomym, obciążenie płata oraz ciąg statyczny silników. Jako masę minimalną m_{min} przyjęto masę pustego samolotu, a jako masę maksymalną m_{maks} maksymalną masę do startu. W ten sposób można w ogólny sposób określić możliwości załadunku samolotu, czyli ilość zabieranego paliwa, pocisków, itd. Rozważana maksymalna liczba Macha powiązana jest z prędkością rzeczywistą na danej wysokości, różnej od poziomu morza. Obciążenie płata wyrażono jako iloraz maksymalnej masy samolotu w konfiguracji do startu do powierzchni skrzydeł. W rozważanej reprezentatywnej puli samolotów znajdują się samoloty wyposażone w jeden, jak również dwa silniki. W przypadku tych drugich porównywany ciąg statyczny stanowi sumę ciągów statycznych obu silników. W niektórych samolotach pojawia się dodatkowy napęd rakietowy, który w analizie nie był brany pod uwagę. Przedstawione wartości ciągów uwzględniają dopalacze. Poniżej w tab. 1 zaprezentowano wszystkie samoloty, których dane przyjęto na podstawie literatury [Belyakov i Marmain 1994, Boyne 1980, Butowski, Pankow, i Ponomariew 1994, Clifford 2002, Francillon 1986, Green i Swanborough 1981, Gunston 1981, Jackson 1985, Jones 1975, Mason 1965, Miller 2005, Shacklady 1963, Siuru 1984, Swanborough i Bowers 1968, Taylor 1974, Wagner 1982, Yefim 2007]. Należą do nich konstrukcje Amerykańskie, Brytyjskie, Niemieckie (w tym III Rzesza), Rosyjskie (w tym ZSRR), Francuskie, Szweckie oraz zbudowane na podstawie współpracy międzynarodowej. Nie brano pod uwagę natomiast samolotów, które powstawały w innych państwach na bazie licencji już istniejących, np. Izraelskie Kfir.

Tabela 1

Spis przyjętych do analizy samolotów myśliwskich

Lp.	Nazwa samolotu	L.p.	Nazwa samolotu
1	Heinkel He 178	8	Yakovlev Jak-15
2	Messerschmitt Me 262	9	Grumman F9F Panther
3	Bell P-59A Airacomet	10	North American F-86 Sabre
4	Gloster Meteror	11	Saab J 29 Tunnan
5	de Havilland Vampire FB 5	12	Dassault MD 450 Ouragan
6	McDonnell FH-1 Phantom	13	Mikoyan-Gurevich MiG-17 I340
7	Mikoyan-Gurevich MiG-9 I-301	14	Hawker Hunter F MK6

Tabela 1

Spis przyjętych do analizy samolotów myśliwskich ciąg dalszy

Lp.	Nazwa samolotu	L.p.	Nazwa samolotu
15	North American F-100 Super Sabre	30	Tornado IDS
16	Lockheed F-104 Starfigher	31	General Dynamics F-16 Fighting Falcon
17	Mikoyan-Gurevich MiG-19 Sm-7	32	Mikoyan-Gurevich MiG-29
18	Mikoyan-Gurevich MiG-21 F-13	33	Sukhoi Su-27
19	Dassault Mirage IIIC	34	Dassault Mirage 2000C
20	McDonnell F-4 Phantom II	35	British Aerospace and McDonnell-Douglas Harrier II AV-8b
21	Lighting F MK 6	36	Dassault Rafale
22	Saab J 32B Lansen	37	JAS 39A Gripen
23	Sukhoi Su-15 Flagon D	38	Sukhoi Su-30KI
24	Mikoyan-Gurevich MiG-25P	39	Lockheed Martin F-22A Raptor
25	Dassault Mirage F1C	40	Eurofighter Typhoon
26	Mikoyan-Gurevich MiG-23UB	41	McDonnell Douglas F-18E Super Hornet
27	Saab JA 37 Viggen	42	Lockheed Martin F-35A Lightning II
28	Grumman F-14 Tomcat	43	Sukhoi Su-35
29	McDonnel Douglas F-15 Eagle		

3. WYNIKI

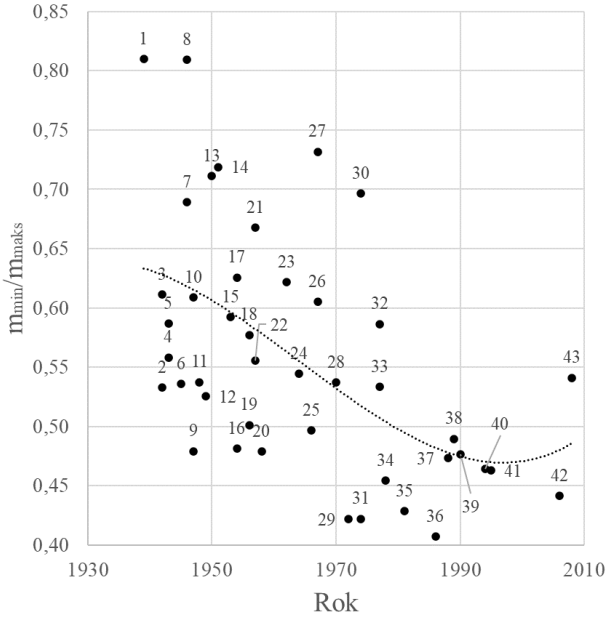
Po zestawieniu wszystkich danych na wykresach wyznaczono funkcje trendu, które opisują wielomiany trzeciego stopnia. Na rys. 1 z upływem lat obserwuje się stały wzrost udźwigu. Krzywa trendu charakteryzuje się pewnym stałym wzrostem w okresie lat 1960 – 1980. Ostatnie lata wskazywałyby na spadek tego parametru, jednakże przyjęta została w tym przypadku mała liczba współczesnych samolotów i w tym można upatrywać pewnego błędu w szacowaniu trendu.

Podobna sytuacja jest w przypadku analizy liczby Macha, rys. 4. Obserwuje się wzrost tego parametru do połowy lat 70-tych. Z tych samych przyczyn, które opisano wyżej, obserwuje się dość niejednoznaczny trend, który być może w rzeczywistości utrzymuje się na pewnej w przybliżeniu stałej wartości. W każdym razie współcześnie zauważa się niewielkie znaczenie prędkości tego typu samolotów w porównaniu z samolotami starszych generacji.

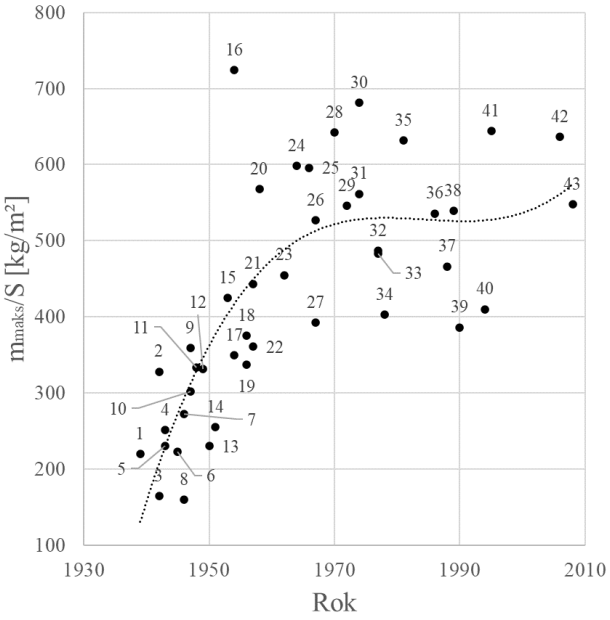
Do początku lat 70-tych także obserwuje się duży wzrost wartości obciążenia skrzydeł, rys. 2. W kolejnych latach funkcja nie zmienia się już tak znacząco, choć zachowany jest trend wzrostowy.

Największy wzorst, na przestrzeni wszystkich lat, wykazuje ostatni z porównywanych parametrów, czyli ciąg statyczny montowanych silników. Nie przekłada się to paradoksalnie na wyraźne wzrosty prędkości. Trzeba jednak pamiętać, że współczesne samoloty myśliwskie mają znacznie większą masę, a dominująca w poprzednich latach aerodynamika samolotu obecnie ustępuje technologii niewidzialności. Samoloty te są przy tym mniej stateczne, a z tego względu zachodzi konieczność bardzo istotnego wsparcia pilota ze strony komputerowych systemów pokładowych.

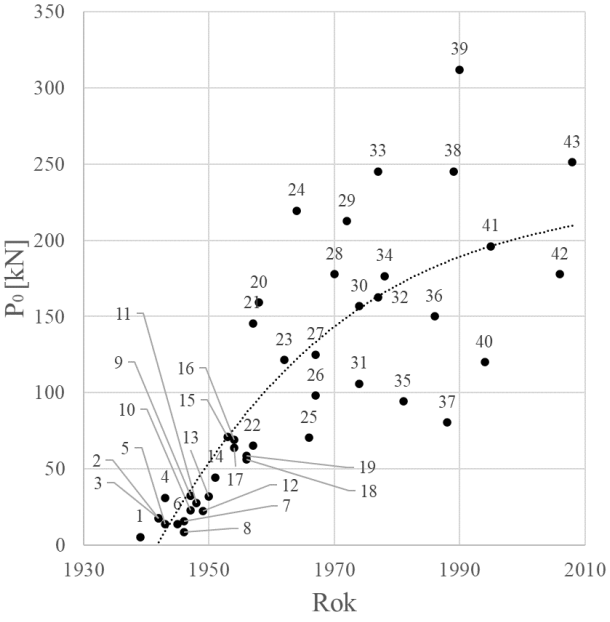
Spośród porównywanych samolotów kilka wyróżnia się z uwagi na dość odmienne wartości parametrów. Pierwszy z nich jest F-104 Starfigher, który posiadał skrzydła o bardzo małym wydłużeniu i grubości. Drugim takim samolotem jest F-22A Raptor, cechujący się wykorzystaniem silników o ogromnym ciągu. Trzecim bardzo interesującym samolotem jest MiG-25, który historycznie uchodzi za najszybszy myśliwiec. Osiągał ponad 2,8 Macha, a w pewnych warunkach nawet ponad 3 Machy.



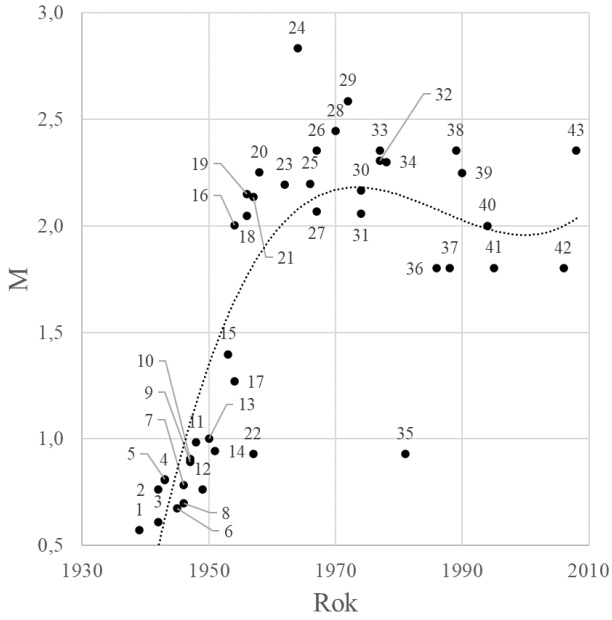
Rys. 1. Iloraz masy pustego i w pełni załadowanego samolotu



Rys. 2. Obciążenie skrzydeł



Rys. 3. Ciąg statyczny



Rys. 4. Maksymalna liczba Macha

4. WNIOSKI

Analiza wykazała, jak duży postęp technologiczny w przypadku samolotów bojocyh można zaobserwować na przestrzeni kilkudziesięciu lat. Większa wiedza dotycząca rozwiązań technologicznych, a przede wszystkim wykorzystywanych materiałów potwierdza, że ładunek samolotów myśliwskich w ostatnich dekadach w sposób ciągły się powiększał. Równolegle towarzyszy temu ciągły wzorst obciążenia płata. Przeprowadzona analiza również udowodniła, że prędkość samolotów bojowych była bardzo ważnym parametrem jedynie do pewnego czasu. W tym porównaniu wykorzystano jedynie 4 parametry, które ukazują pewne cechy samolotów. Aby w tej kwesti uzyskać więcej informacji należałoby użyć jeszcze większej reprezentatywnej puli samolotów analizując także większą liczbę ich parametrów.

LITERATURA

1. Belyakov and Marmain, 1994, Mig : Fifty Years Of Secret Aircraft Design, Naval Instutute Press
2. Boyne, W. J., 1980, Messerschmitt Me 262, Arrow to the Future, Washington: Smithsonian Institution Press
3. Butowski P., Pankow W, Ponomariew W., 1994, Su-15 Flagon, Monografie lotnicze 14, Aj-Press
4. Clifford Matthews, 2002, Aeronautical engineer's data book, Clifford Matthews
5. Francillon R., 1986, Dassault Mirage F1, Midland Counties Publications
6. Green W. and Swanborough G., 1981, The Worlds Great Fighter Aircraft, Crescent Books
7. Gunston B., 1981 ed., The Illustrated History of Fighters, London: Phoebus Publishing Co.
8. Jackson P., 1985, Mirage Modern Combat Aircraft 23, Motorbooks International
9. Jones, L. S., 1975, U.S. Fighters, Aero Publishers
10. Mason F. K., 1965, The De Havilland Vampire Mk. 5 & 9, Profile Publications, No 48
11. Miller J., 2005, Lockheed Martin F/A-22 Raptor, Midland Publishing
12. Shacklady E., 1963, The Gloster meteor, MacDonald Aircraft Monographs, Doubleday & Co.
13. Siuru W. D. Jr., 1984, Harrier British Aerospace and McDonnel Douglass AV-8A/B, Aero Publishers
14. Swanborough G. and Bowers P. M., 1968 United States Navy Aircraft Since 1911, Funk & Wagnalls
15. Taylor J. W. R., ed., 1974, Jane's All the Worlds Aircraft, 1974-75, Franklin Watts
16. Wagner R., 1982, American Combat Planes, third enlarged ed., Doubleday & Co.
17. Yefim G., 2007, Sukhoi Su-27 Famous Russian Aircraft, Midland Publishing

ANALYSIS OF FIGHTERS BASED ON SELECTED PARAMETERS

Abstract

The paper presents a comparative analysis of the parameters of fighters with a turbojet drive. Aircraft masses, wing load, thrusts and speeds were taken into account. There were showed these parameters in changed over the years, from the beginnings of the first turbojet airplanes to the present day. On this basis, the trend functions were obtained, the shape of which was presented in the attached figures.

Keywords: flight mechanics, aerodynamics

Łukasz BRODZIK *

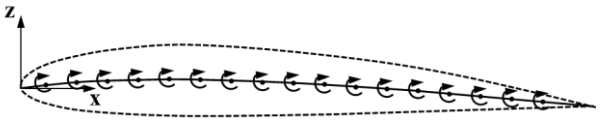
ZASTOSOWANIE TEORII CIENKIEGO PROFILU DO WYZNACZANIA CHARAKTERYSTYKI AERODYNAMICZNEJ

W artykule przedstawiono analizę związaną z wykorzystaniem teorii cienkiego profilu. Zawarto w nim najważniejsze informacje i założenia tej metody. Przy jej pomocy wyznaczona została charakterystyka aerodynamiczna $C_z(\alpha)$ i $C_m(\alpha)$ dla wybranej grupy profili lotniczych. Wyniki porównano z danymi literaturowymi.

Słowa kluczowe: mechanika płynów, aerodynamika, teoria cienkiego profilu

1. WPROWADZENIE

W przypadku dwuwymiarowych przepływów nieściśliwych dla profili cienkich wypadkowa siła aerodynamiczna i moment zależą prawie wyłącznie od kąta natarcia i kształtu szkieletowej. Z tego względu można założyć, że w takich przypadkach w obliczeniach grubość profilu jest równa 0. Istotą teorii cienkiego profilu (metody wirowej) jest uczynienie szkieletowej linią prądu, która jest ściśle zależna od jej geometrii. Wzdłuż tej linii można przedstawić rozkład cyrkulacji, rys. 1.



Rys. 1. Rozkład cyrkulacji zgodnie z teorią cienkiego profilu

Konsekwencją przyjętej grubości o niewielkim wymiarze jest założenie, że rozkład cykrulacji na szkieletowej w przybliżeniu odpowiada rozkładowi cyrkulacji na cięciwie.

* Zakład Inżynierii Lotniczej, Politechnika Poznańska

Podstawowe równanie teorii cienkiego profilu jest następujące [Katz i Plotkin 2001]

$$\frac{1}{2\pi}\int_0^b \frac{\gamma(x_0)}{x-x_0}dx_0 = v_\infty\left(\alpha - \frac{dz_f}{dx}\right) \tag{1}$$

gdzie
$\gamma(x_0)$ – rozkład cyrkulacji
α – kąt natarcia
v_∞ – prędkość przepływu swobodnego

Dla tego równania przyjęty jest warunek brzegowy (warunek Kutty) [Anderson 2011]

$$\gamma(b) = 0 \tag{2}$$

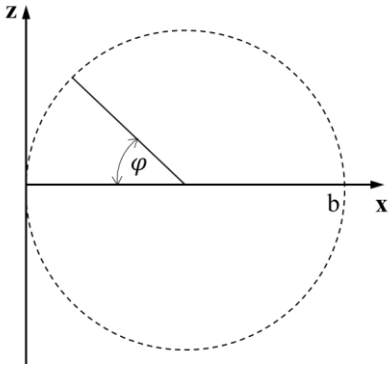
Celem pracy jest porównanie charakterystyk $C_z(\alpha)$ i $C_m(\alpha)$ wyznaczonych za pomocą obliczeń analitycznych związanych z teorią cienkiego profilu oraz danymi literaturowymi [Abbot i Doenhoff 1959].

2. WYZNACZENIE WSPÓŁCZYNNIKA SIŁY NOŚNEJ

Rozwiązanie postawionego problemu rozwiązuje się za pomocą przybliżenia Glauerta i szeregu Fouriera (nieskończonego szeregu rozkładu cyrkulacji) [Arżanikow i Malcew 1959]

$$\gamma(\varphi) = 2v_\infty\left(A_0\frac{1+\cos\varphi}{\sin\varphi} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\varphi)\right) \tag{3}$$

Kąt φ zmienia się od 0 do π, zgodnie z rys. 2.



Rys. 2. Rozkład wirów zgodnie z teorią cienkiego profilu

Można też stwierdzić, że $dz_f(x)$ wyrażone jest przez φ za pomocą równania

$$\left(\frac{x}{b}\right) = 0{,}5 \cdot (1 - \cos\varphi)$$

Współczynniki po rozwinięciu

$$A_0 = \alpha - \frac{1}{\pi}\int_{\varphi=0}^{\pi} \frac{dz_f}{dx} d\varphi \tag{4}$$

$$A_n = \frac{2}{\pi}\int_{\varphi=0}^{\pi} \frac{dz_f}{dx} \cos(n\varphi) d\varphi \tag{5}$$

Zgodnie z danymi profilu równania opisujące szkieletową są następujące:

dla $\frac{x}{b} \leq 0{,}4$ to

$$z_{f1} = \frac{\bar{f}}{\bar{x}_f{}^2}\left[2 \cdot \bar{x}_f \cdot \left(\frac{x}{b}\right) - \left(\frac{x}{b}\right)^2\right] = 0{,}125\left[0{,}8 \cdot \left(\frac{x}{b}\right) - \left(\frac{x}{b}\right)^2\right]$$

dla $\frac{x}{b} > 0{,}4$ to

$$z_{f2} = \frac{\bar{f}}{(1 - \bar{x}_f)^2}\left[(1 - 2 \cdot \bar{x}_f) + 2 \cdot \bar{x}_f \cdot \left(\frac{x}{b}\right) - \left(\frac{x}{b}\right)^2\right] =$$

$$= 0{,}0555\left[0{,}2 + 0{,}8 \cdot \left(\frac{x}{b}\right) - \left(\frac{x}{b}\right)^2\right]$$

Pochodne równań są następujące:

dla $\frac{x}{b} \leq 0{,}4$ to

$$\frac{dz_{f1}}{dx} = 0{,}125\left[0{,}8 \cdot \left(\frac{x}{b}\right) - \left(\frac{x}{b}\right)^2\right] = 0{,}1 - 0{,}25 \cdot \left(\frac{x}{b}\right)$$

dla $\frac{x}{b} > 0{,}4$ to

$$\frac{dz_{f2}}{dx} = 0{,}0555\left[0{,}2 + 0{,}8 \cdot \left(\frac{x}{b}\right) - \left(\frac{x}{b}\right)^2\right] = 0{,}0444 - 0{,}1111 \cdot \left(\frac{x}{b}\right)$$

Otrzymane równania przekształcamy zgodnie z równaniem:

$$\left(\frac{x}{b}\right) = 0{,}5 \cdot (1 - \cos\varphi)$$

dla $\frac{x}{b} \leq 0{,}4$ to

$$\frac{dz_{f1}}{dx} = 0{,}1 - 0{,}25 \cdot \left(\frac{x}{b}\right) = 0{,}125 \cdot \cos\varphi - 0{,}025$$

dla $\frac{x}{b} > 0{,}4$ to

$$\frac{dz_{f2}}{dx} = 0{,}0444 - 0{,}1111 \cdot \left(\frac{x}{b}\right) = 0{,}0555 \cdot \cos\varphi - 0{,}0111$$

Ponieważ

$$\left(\frac{x}{b}\right) = 0{,}5 \cdot (1 - \cos\varphi) = 0{,}4$$

to

$$\varphi = 1{,}3694\ [\mathrm{rad}]$$

Pierwsze współczynniki związane z rozkładem wirów odpowiednio

$$A_0 = \alpha - \frac{1}{\pi}\int_{\varphi=0}^{\varphi=\pi} \frac{dz_f}{dx} d\varphi =$$

$$= \alpha - \frac{1}{\pi}\int_{0}^{1{,}3694} \frac{dz_{f1}}{dx} d\varphi - \frac{1}{\pi}\int_{1{,}3694}^{\pi} \frac{dz_{f2}}{dx} d\varphi = \alpha - 0{,}0045$$

$$A_1 = \frac{2}{\pi}\int_{\varphi=0}^{\varphi=\pi} \frac{dz_f}{dx} \cos(\varphi)\, d\varphi =$$

$$= \frac{2}{\pi}\int_{0}^{1{,}3694} \frac{dz_{f1}}{dx} \cos(\varphi)\, d\varphi + \frac{2}{\pi}\int_{1{,}3694}^{\pi} \frac{dz_{f2}}{dx} \cos(\varphi)\, d\varphi = 0{,}0815$$

$$A_2 = \frac{2}{\pi}\int_{\varphi=0}^{\varphi=\pi} \frac{dz_f}{dx} \cos(2\varphi)\, d\varphi =$$

$$= \frac{2}{\pi}\int_{0}^{1{,}3694} \frac{dz_{f1}}{dx} \cos(2\varphi)\, d\varphi + \frac{2}{\pi}\int_{1{,}3694}^{\pi} \frac{dz_{f2}}{dx} \cos(2\varphi)\, d\varphi = 0{,}0139$$

Współczynnik siły nośnej [5]

$$C_z = 2\pi(\alpha - \alpha_0) = 2\pi(A_0 + 0{,}5A_1) \tag{6}$$

$$C_z = 2\pi\alpha + 0{,}2278$$

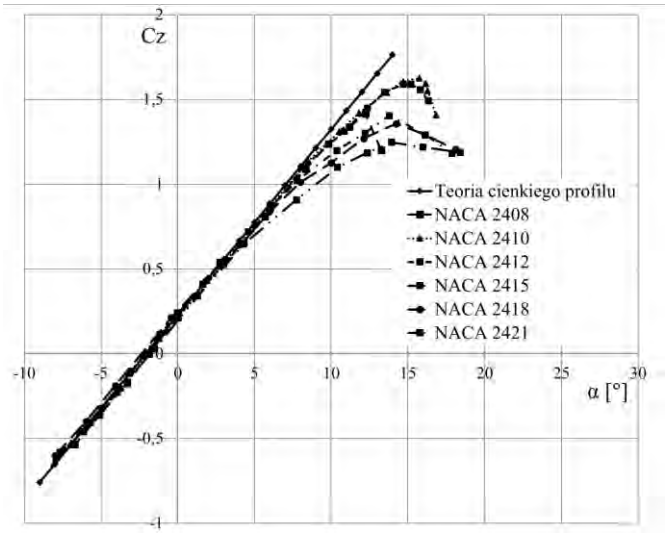
Współczynnik momentu [Milne-Thomson 1973]:

$$C_m = 0{,}25\pi(A_2 - A_1) \tag{7}$$

3. WYNIKI

Wszystkie porównywane krzywe profili czterocyfrowych mają bardzo zbliżone wartości $C_z(\alpha)$ w odniesieniu do prostej wyznaczonej za pomocą metody wirowej. Szczególnie dotyczy to małych ujemnych kątów natarcia oraz dodatnich kątów do 5°. Po przekroczeniu tego kąta rozbieżności widoczne są dla profili o największej grubości, czyli NACA 2421 oraz NACA 2418. Prosta najlepiej odpowiada krzywej profilu

NACA 2408, dla którego maksymalny współczynnik siły nośnej przesunięty jest o α≈1°. Współczynniki momentu dla przyjętych profili zmieniają się w podobny sposób, w zakresie ok -0,05 dla kątów ujemnych do ok -0,04 dla 12°, rys. 3 Dla porównania zgodnie z teorią wirów współczynnik ten jest stały i wynosi -0,053.



Rys. 3. Porównanie obliczonej funkcji $C_z(\alpha)$ z danymi literaturowymi wybranych profili

4. WNIOSKI

Teoria cienkiego profilu jest jedną z dwóch ważnych metod (oprócz metody przybliżonego odwzorowania konforemnego) określania opływu profili. W artykule potwierdzono, że dzięki wyżej wymienionej metodzie uzyskuje się najlepsze wyniki w zakresie niedużych kątów. Ważną konkluzją jest również fakt, że coraz większa grubość profilu wpływa nie tylko na pojawienie się rozbieżności wyników dla mniejszych kątów natarcia ale również oddalenie od wyznaczonej prostej punktu związanego z krytycznym kątem natarcia.

LITERATURA

1. Katz J., Plotkin A., 2001, Low-speed aerodynamics, Cambridge University Press
2. Anderson J. D., 2011, Fundalemntals of aerodynamics, McGraw-Hill
3. Abbot I. H., Doenhoff A. E., 1959, Theory of wing sections, Dover Publications
4. Arżanikow N. S., Malcew W. N., 1959, Aerodynamika, Państwowe Wydawnictwo Naukowe
5. Milne-Thomson L. M., 1973, Theoretical aerodynamics, Dover Publications

APPLICATION OF THE THIN AIRFOIL THEORY TO DETERMINING AERODYNAMIC CHARACTERISTICS

Abstract

The paper presents an analysis related to the use of the thin airfoil theory. The most important information and assumptions of this method are presented. It was used to determine aerodynamic characteristic $C_z(\alpha)$ and $C_m(\alpha)$ for a selected group of profiles. The results were compared with the results from literature.

Keywords: fluid mechanics, aerodynamics, thin airfoil theory

Michał CIAŁKOWSKI*
Magda JOACHIMIAK*
Aleksander OLEJNIK **
Andrzej FRĄCKOWIAK*
Krzysztof GRYSA***

BILANS ENERGII JAKO METODA QUASI-REGULARYZACJI ZAGADNIENIA CAUCHY'EGO W OBSZARZE DWUWARSTWOWYM

Turbiny gazowe są poddawane dużym obciążeniom cieplnym. Wiąże się to z koniecznością pracy turbiny przy możliwie dużej sprawności. Zachowanie właściwości wytrzymałościowych elementów turbiny takich jak łopatki jest możliwe tylko przy nie przekroczeniu temperatury dopuszczalnej. W celu zmniejszenia obciążenia cieplnego łopatki są pokrywane warstwą ceramiki. W niniejszej pracy analizowano rozwiązanie zagadnienia odwrotnego dla równania przewodnictwa ciepła w obszarze dwuwarstwowym (metal - ceramika) pod kątem badania obciążeń cieplnych. Wyznaczono warunki brzegowe w postaci temperatury, gęstości strumienia ciepła oraz współczynnika przejmowania ciepła na powierzchni zewnętrznej ceramiki. Zagadnienie należy do klasy zagadnień źle postawionych w sensie Hadamarda. Przedstawione w pracy zagadnienie Cauchy’ego nie wymaga klasycznej regularyzacji.

Słowa kluczowe: bilans energii, obciążenie cieplne łopatek turbin gazowych, zagadnienie Cauchy'ego dla równania przewodnictwa ciepła, quasiregularyzacja

1. WPROWADZENIE

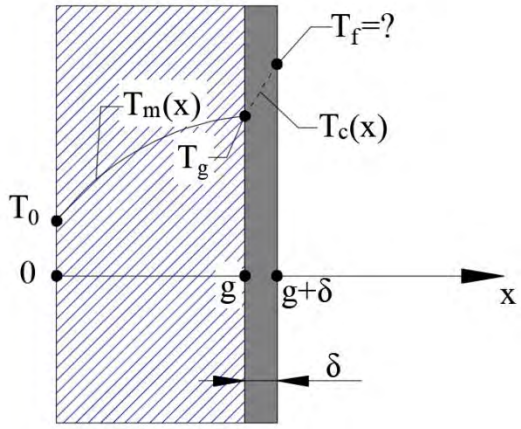
Łopatki turbin gazowych są elementami maszyn na które podczas pracy działają duże obciążenia cieplne [Frąckowiak et al. 2021]. W celu ich zmniejszenia pokrywa się powierzchnię zewnętrzną łopatki warstwą ceramiki o dużej oporności cieplnej [Ciałkowski et al. 2020]. Aby nie doszło do utraty właściwości mechanicznych ło-

* Instytut Energetyki Cieplnej, Politechnika Poznańska
** Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego w Warszawie
*** Politechnika Świętokrzyska

patki na granicy metalu i ceramiki nie może zostać przekroczona temperatura dopuszczalna. Właściwy dobór rodzaju ceramiki oraz jej grubości jest niezbędny do kontroli obciążeń cieplnych na dopuszczalnym poziomie [Ciałkowski et al. 2022]. Znając przebieg temperatury na granicy metal - ceramika, temperaturę po stronie wewnętrznej łopatki i temperaturę początkową możliwe jest wyznaczenie przebiegu temperatury na powierzchni zewnętrznej ceramiki. Problem ten jest zagadnieniem odwrotnym typu Cauchy'ego [Ciałkowski et al. 2022]. Zagadnienie to jest źle uwarunkowane numerycznie i z reguły wymaga regularyzacji [Joachimiak 2020]. Dotychczas prowadzone były badania numeryczne nad tworzeniem modeli obliczeniowych dla zagadnień odwrotnych typu Cauchy'ego nie wymagających klasycznej regularyzacji [Ciałkowski et al. 2022, Joachimiak, Ciałkowski i Frąckowiak 2020, Joachimiak et al. 2019]. Niniejsza praca jest ich kontynuacją.

2. MODEL OBLICZENIOWY

W niniejszej pracy przedstawiono rozwiązanie jednowymiarowego zagadnienia odwrotnego dla niestacjonarnego równania przewodzenia ciepła w obszarze dwuwarstwowym złożonym z warstwy metalu i ceramiki (rys. 1). Założono że grubość warstwy ceramiki jest istotnie mniejsza niż warstwy metalu, a zagadnienie rozważano w warstwie płaskiej.



Rys. 1. Obszar obliczeniowy

Równanie przewodzenia ciepła w warstwie metalu jest następujące

$$\rho_m c_m \frac{\partial T_m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial x}\right), \quad x \in (0, g), \; t > 0 \tag{1}$$

Natomiast dla warstwy ceramiki mamy równanie postaci

$$\rho_c c_c \frac{\partial T_c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_c \frac{\partial T_c}{\partial x}\right), \quad x \in (g, g+\delta), \; t > 0 \tag{2}$$

Obliczenia wykonano dla warunku początkowego (t = 0)

$$T(x,0) = f(x), \quad x \in \langle 0, g+\delta \rangle \tag{3}$$

Przyjęto warunek brzegowy na powierzchni x = 0

$$T(0,t) = T_0(t) \tag{4}$$

oraz warunek zgodności temperatury i strumieni ciepła na powierzchni x = g (granica warstw metal – ceramika)

$$T_m(g,t) = T_c(g,t) = T_g(t) \tag{5}$$

$$\lambda_m \frac{\partial T_m(g,t)}{\partial x} = \lambda_c \frac{\partial T_c(g,t)}{\partial x} \tag{6}$$

Rozwiązanie równań (1) i (2) z warunkami (3)- (6) uzupełniono o bilans energii w warstwie ceramiki postaci

$$I = \int_g^{g+\delta} \frac{\rho(T^n)c(T^n)}{\Delta t}(T^{n+1} - T^n)dx = \\ = \lambda_c(T^n)\frac{dT^{n+1}}{dx}\Big|_{x=g+\delta} - \lambda_c(T^n)\frac{dT^{n+1}}{dx}\Big|_{x=g} \tag{7}$$

gdzie gęstość ρ, ciepło właściwe c oraz współczynnik przewodzenia ciepła λ są zależne od temperatury w n-tej jednostce czasu, co zapisano (T^n). Poszukiwaną temperaturę w n+1 jednostce czasu zapisano T^{n+1}, natomiast krok czasowy oznaczono Δt. Model obliczeniowy szczegółowo opisano w pracy [Ciałkowski et al. 2022]. Na podstawie temperatury powierzchni zewnętrznej ceramiki, rozwiązania zagadnienia bezpośredniego oraz temperatury gazu wyznaczono również gęstość strumienia ciepła

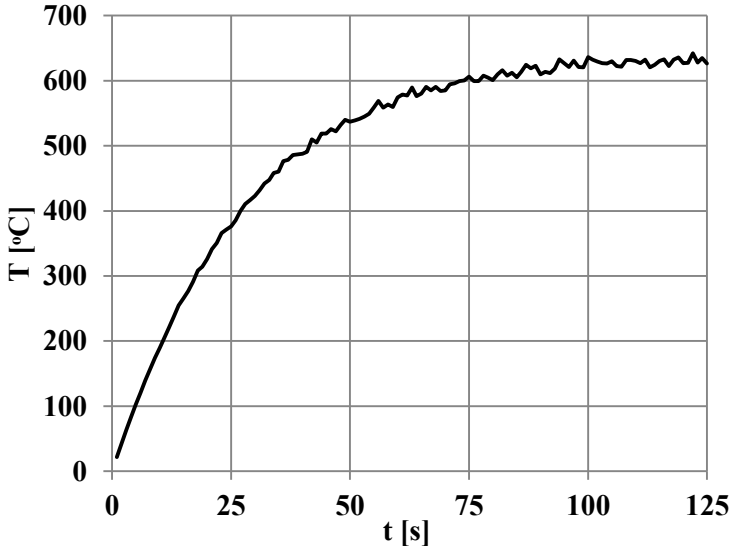
$$q(t) = \lambda_c \frac{\partial T_c(g+\delta,t)}{\partial x} \tag{8}$$

oraz współczynnik przejmowania ciepła

$$\alpha(t) = \frac{q(t)}{T_g(t) - T_c(g+\delta,t)} \tag{9}$$

3. ZAŁOŻENIA DO OBLICZEŃ

Założono grubość warstwy metalu g = 5 mm oraz ceramiki δ = 0.5 mm. Na styku metalu i ceramiki przyjęto zaburzoną pomiarami temperaturę, której przebieg przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Założona temperatura na styku metal-ceramika

Obliczenia wykonano uwzględniając zależność gęstości, ciepła właściwego oraz współczynnika przewodzenia ciepła od temperatury dla metalu i ceramiki (tlenek cyrkonu). Zależności te opisano wzorami

- dla metalu

$$\lambda_m = 5\cdot 10^{-8}T^3 - 4\cdot 10^{-5}T^2 - 0.0126T + 48.276 \tag{10}$$

$$c_m = 7\cdot 10^{-10}T^4 + 10^{-6}T^3 - 0.001T^2 + 0.5691T + 450.23 \tag{11}$$

$$\rho_m = -9\cdot 10^{-5}T^2 - 0.2804T + 7862.3 \tag{12}$$

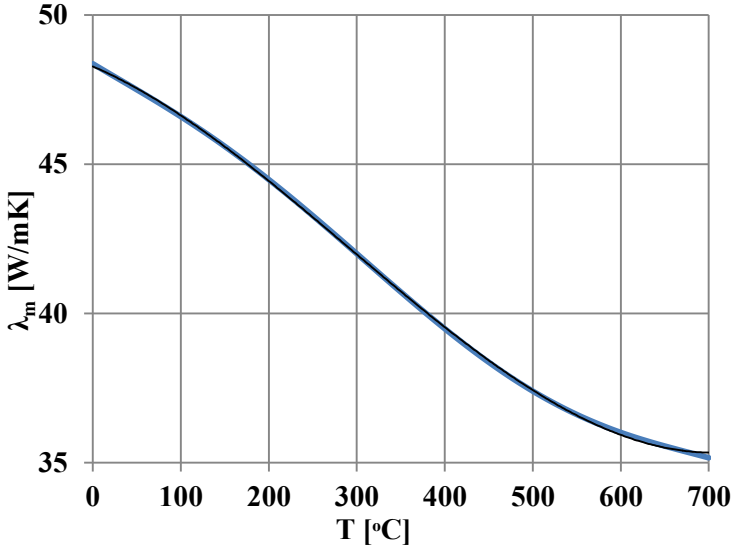
- dla ceramiki

$$\lambda_c = -2\cdot 10^{-10}T^3 + 5\cdot 10^{-7}T^2 + 7\cdot 10^{-5}T + 1.9365 \tag{13}$$

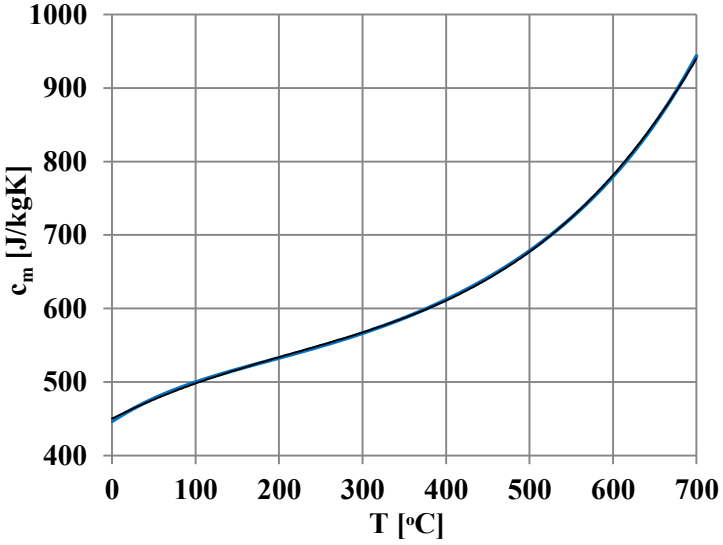
$$c_c = 7\cdot 10^{-14}T^5 - 4\cdot 10^{-10}T^4 + 9\cdot 10^{-7}T^3 - 0.001T^2 + 0.633T + 445.35 \tag{14}$$

$$\rho_c = -2\cdot 10^{-8}T^2 - 0.0001T + 6.1028 \tag{15}$$

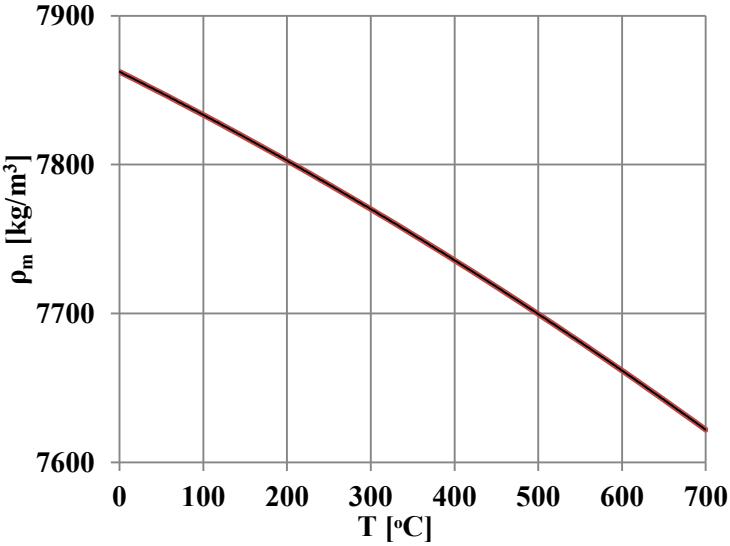
Powyższe zależności przedstawiono na rysunkach 3-8.



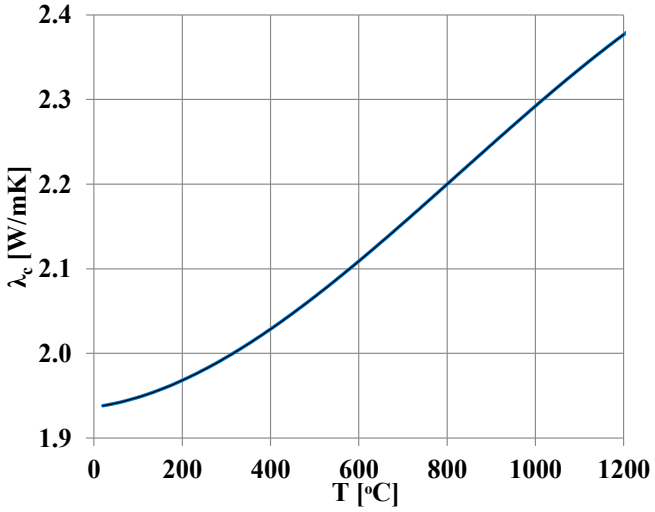
Rys. 3. Współczynnik przewodzenia ciepła metalu w funkcji temperatury



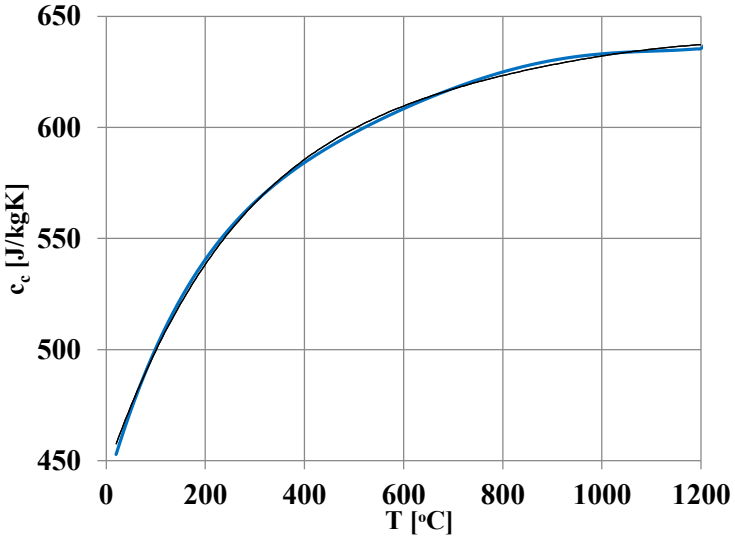
Rys. 4. Ciepło właściwe metalu w funkcji temperatury



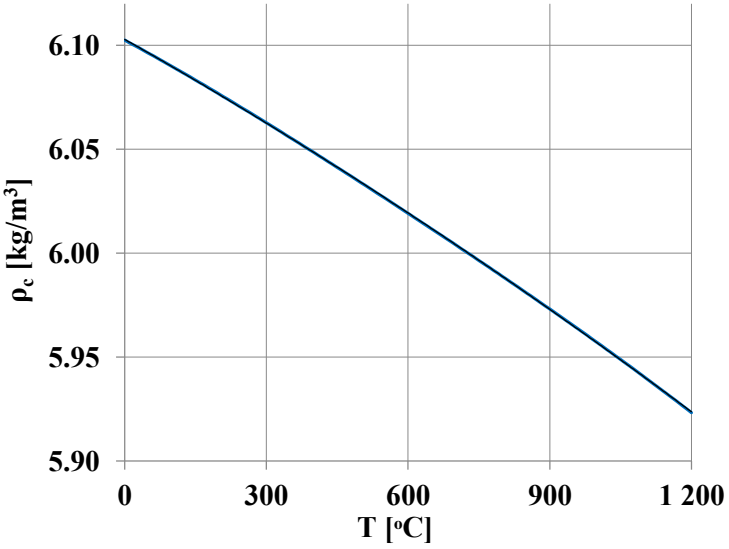
Rys. 5. Gęstość metalu w funkcji temperatury



Rys. 6. Współczynnik przewodzenia ciepła ceramiki w funkcji temperatury



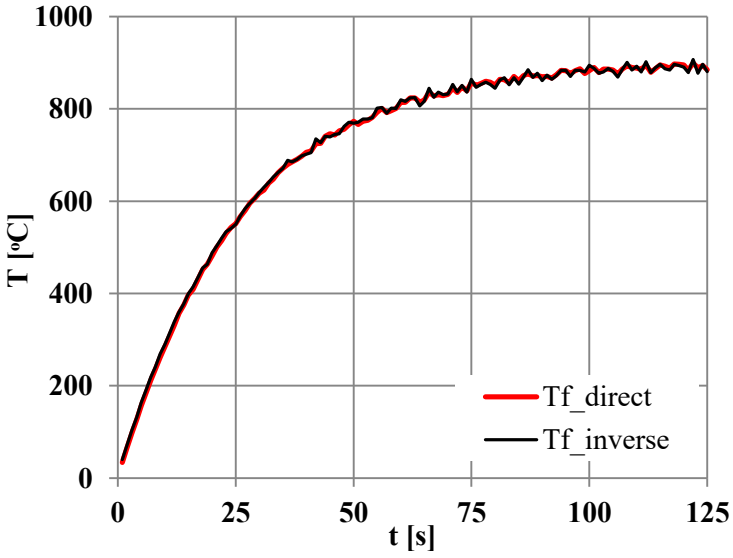
Rys. 7. Ciepło właściwe ceramiki w funkcji temperatury



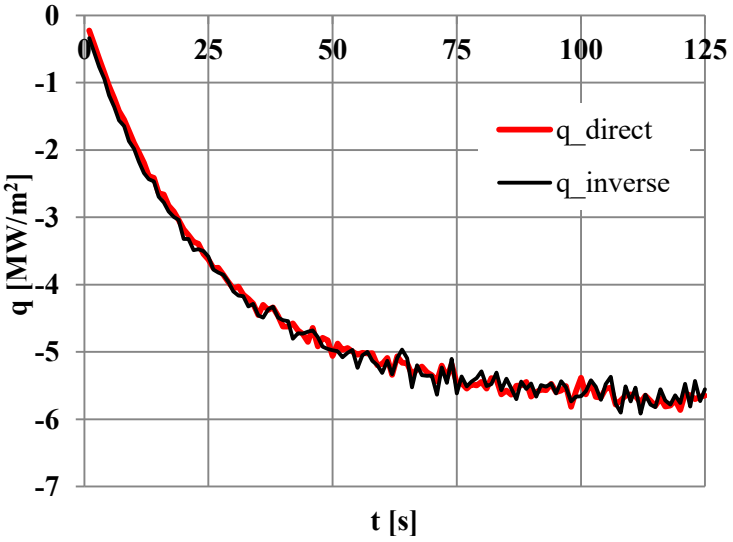
Rys. 8. Gęstość ceramiki w funkcji temperatury

4. WYNIKI

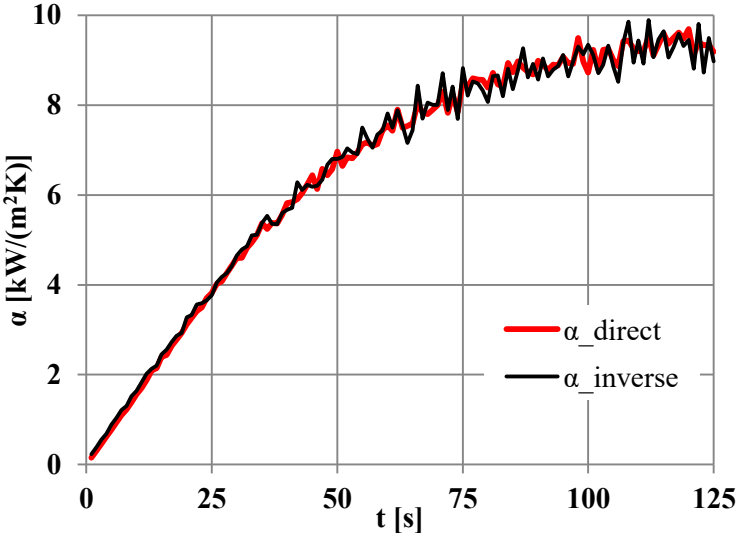
Testy numeryczne wykonano przy losowym zaburzeniu temperatury na styku metalu i ceramiki T_g mającym wartości od -0.01 do 0.01 wartości wspomnianej temperatury. Zaburzenie współczynnika przewodzenia ciepła oraz ciepła właściwego było liczbą losową z przedziału od -0.025 do 0.025 wartości parametru.



Rys. 9. Przebieg temperatury na powierzchni zewnętrznaj ceramiki założony (direct) oraz obliczony z zastosowaniem rozwiązania zagadneinia odwrotnego (inverse)



Rys. 10. Przebieg gęstości strumienia ciepła na powierzchni zewnętrznaj ceramiki założony (direct) oraz obliczony z zastosowaniem rozwiązania zagadneinia odwrotnego (inverse)



Rys. 11. Przebieg współczynnika przejmowania ciepła na powierzchni zewnętrznaj ceramiki założony (direct) oraz obliczony z zastosowaniem rozwiązania zagadneinia odwrotnego (inverse)

Założone wartości temperatury (rys. 9), gęstości strumienia ciepła (rys. 10) oraz współczynnika przejmowania ciepła (rys. 11) porównano z wartościami obliczonymi z zastosowaniem rozwiązania zagadnienia odwrotnego. Wartości te różniły się w nieznacznym stopniu (rys. 9-11). Maksymalne różnice pomiędzy wartościami założonymi (direct) oraz obliczonymi (inverse) obliczono z użyciem normy maksymalnej postaci

$$N_{\max}(f) = \max_i \left| f_{direct}(t_i) - f_{inverse}(t_i) \right| \tag{16}$$

Wartości normy N_{max} dla temperatury wyniosły 11.8 ^{o}C, dla gęstości strumienia ciepła około 272 MW/m^2, natomiast dla współczynnika przejmowania ciepła blisko 620 kW/m^2 (tabela 1).

Tabela 1

Wartości normy N_{max} dla temperatury, gęstości strumienia ciepła oraz współczynnika przejmowania ciepła

$N_{max}(T)$	$N_{max}(q)$	$N_{max}(\alpha)$
11.8	272 010	619.7

Z kolei wartości normy względnej obliczono zgodnie ze wzorem

$$N_2(f) = \frac{\max_i \left| f_{direct}(t_i) - f_{inverse}(t_i) \right|}{\max_i \left| f_{direct}(t_i) \right|} \cdot 100\% \tag{17}$$

Tabela 2

Wartości normy N_2 dla temperatury, gęstości strumienia ciepła oraz współczynnika przejmowania ciepła

$N_2(T)$ [%]	$N_2(q)$ [%]	$N_2(\alpha)$ [%]
1.32	4.64	6.39

Wartości normy N_2 dla temperatury, gęstości strumienia ciepła oraz współczynnika przejmowania ciepła wynoszą kolejno 1.32 %, 4.64 % oraz 6.39%. Wartości te świadczą o uzyskaniu stabilnego rozwiązania zagadnienia Cauchy'ego pomimo braku klasycznej regularyzacji.

5. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono rozwiązanie jednowymiarowego niestacjonarnego zagadnienia odwrotnego typu Cauchy'ego. Obliczenia wykonano w obszarze dwu-

warstwowym złożonym z warstwy metalu o dużej przewodności cieplnej i ceramiki będącej izolatorem. Przedstawione w pracy testy numeryczne pokazują że możliwe jest uzyskanie warunków brzegowych w postaci temperatury, gęstości strumienia ciepła oraz współczynnika przejmowania ciepła na powierzchni zewnętrznej ceramiki bez zastosowania klasycznej regularyzacji. Zastosowana quasiregularyzacja w postaci bilansu energii w warstwie ceramiki pozwoliła na otrzymanie wartości warunków brzegowych niewiele różniących się od wartości założonych w testach numerycznych. Obliczenia wykonano przy losowych zaburzeniach wartości temperatury na styku warstw metalu i ceramiki (do 1%) oraz przy losowych zaburzeniach współczynnika przewodzenia ciepła i ciepła właściwego (do 2.5%).

LITERATURA

1. Frąckowiak A., Olejnik A., Wróblewska A., Ciałkowski M., 2021, Application of the Protective Coating for Blade's Thermal Protection, Energies, 14(1), 50, s.1-14.
2. Ciałkowski M., Olejnik A., Frąckowiak A., Lewandowska N., Mosiężny J., 2020, Cauchy type inverse problem in a two-layer area in the blades of gas turbine, Energy, vol. 212, 118751.
3. Ciałkowski M., Olejnik A., Joachimiak M., K. Grysa, A. Frąckowiak, 2022, Cauchy type nonlinear inverse problem in a two-layer area, International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, vol. 32, no. 1, pp. 313-331.
4. Joachimiak M., 2020, Choice of the regularization parameter for the Cauchy problem for the Laplace equation, International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, vol. 30, no. 10, pp. 4475-4492.
5. Joachimiak M., Ciałkowski M., Frąckowiak A., 2020, Stable method for solving the Cauchy problem with the use of Chebyshev polynomials, International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, vol. 30, no. 3, pp. 1441-1456
6. Joachimiak M., Joachimiak D., Ciałkowski M., Małdziński L., Okoniewicz P., Ostrowska K., 2019, Analysis of the heat transfer for processes of the cylinder heating in the heat-treating furnace on the basis of solving the inverse problem, International Journal of Thermal Sciences, vol. 145, pp. 1-11, 105985.

ACKNOWLEDGEMENTS

Źródło finanansowania 0712/SBAD/5202

ENERGY BALANCE AS A METHOD FOR QUASIREGULARIZATION OF THE CAUCHY PROBLEM IN THE TWO-LAYER AREA

Abstract

Gas turbines are subjected to high thermal loads. This requires the turbine to operate at the highest possible efficiency. The durability of the turbine components, such as blades, can only be maintained if the permissible temperature is not exceeded. In order to reduce the heat load, the blades are coated with a ceramic layer. In this paper, the solution of the inverse problem for the heat conduction equation in the two-layer area ("metal-ceramic") is analysed from the point of view of thermal load testing. Boundary conditions were determined in the form of temperature, heat flux density and heat transfer coefficient on the external surface of ceramics. The problem belongs to the class of ill-posed problems in the Hadamard sense. The Cauchy problem presented in this paper does not require classical regularisation.

Keywords: energy balance, heat load on gas turbine blades, Cauchy problem for the heat conduction equation, quasiregularisation

Michał CIAŁKOWSKI*
Natalia LEWANDOWSKA*
Marcin WAROT**
Maciej MICKER**

PODSTAWY FIZYCZNE WYBORU PARAMETRU DIAGNOSTYCZNEGO WZROSTU ZŁOGÓW

Zwężenie tętnicy szyjnej jest istotną przyczyną niedokrwienia mózgu. Istotnym elementem określającym zwiększone ryzyko udaru mózgu jest procent zwężenia pola przekroju tętnicy powodujące istotnie hemodynamiczne zaburzenie w przepływie krwi. Przeanalizowano cztery wyidealizowane postacie przyrostu blaszki miażdżycowej i wyznaczono parametr diagnostyczny określający istotne zaburzenia w przepływie krwi. Parametr ten wyraża stosunek względnego spadku siły tarcia do względnego przyrostu pola złogów. Analizie poddano warstwowy typ narastania złogów, następnie kołowy, soczewkowy i wreszcie mimośrodowy. Okazuje się, że bez względu na kształt złogów i ich geometrię, dochodzi do szybkich i istotnych zmian parametru diagnostycznego przy zwężeniu powyżej 60% światła tętnicy. Ciekawym również spostrzeżeniem z przeprowadzonych obliczeń jest możliwość szybkiego przyrostu zmian miażdżycowych powyżej granicy 60%.

Słowa kluczowe: miażdżyca, złogi, zaburzenia przepływu krwi, parametr diagnostyczny

1. WPROWADZENIE

Zwężenie lub niedrożność tętnic bez względu na ich przyczynę powstania powoduje obniżenie przepływu krwi przez patologicznie zmienione naczynie tętnicze i w efekcie skutkuje niedokrwieniem tkanek. W zależności od obszaru unaczynienia zwężonej tętnicy może powodować najczęściej niedokrwienie mięśnia sercowego, niedokrwienie mózgu i niedokrwienie kończyn dolnych. Przepływ krwi przez zwężone naczynie krwionośne podlega regulacji według zasad hemodynamiki (the fundamental laws of fluid dynamics). Głównym parametrem opisującym zaburzenia

* Politechnika Poznańska
** Uniwersytet Medyczny z Poznaniu

w dynamice przepływu krwi jest wielkość zwężenia naczynia krwionośnego. Oczywiście oprócz wyrażonego w procentach zwężenia tętnicy wpływ na wielkość niedokrwienia tkanek mają przyspieszenie akcji serca [Abbot i Bouchier-Hayes 1978], rozwój krążenia obocznego [Allwood 1962] i rozkurcz arterioli i zwieraczy przedwłośniczkowych [Angelides i Nicolaides 1979].

Głównym procesem powodującym zwężenie lub niedrożność tętnicy jest miażdżyca, w większości przypadków dotycząca dużych tętnic, co daje możliwości terapeutyczne wewnątrznaczyniowe lub chirurgiczne. Miażdżyca jest chorobą degeneracyjną, przewlekłą i charakteryzuje się zwężeniem lub niedrożnością światła dużych tętnic, a także stanowi podstawę do tworzenia się zakrzepów, owrzodzeń blaszek miażdżycowych i embolizacji tętnic położonych obwodowo od miejsca pierwotnej zmiany miażdżycowej. Najistotniejszą kwestią dla klinicysty, który podejmuje decyzje o konieczności leczenia zwężonej tętnicy jest procentowa wartość zmniejszenia światła naczynia krwionośnego, przy której następują istotne zaburzenia w przepływie krwi. Przeprowadzone eksperymenty [May et al. 1963, Moore i Malone 1979] wykazały, że dopiero ponad 75% ograniczenie światła tętnicy powoduje spadek przepływu krwi i ciśnienia. Utrata energii przepływającego płynu przez zwężoną tętnicę jest odwrotnie proporcjonalna do czwartej potęgi promienia zwężenia mierzonego w stosunku do niezmienionego odcinka naczynia krwionośnego [Berguer i Hwang 1974, Byar et al. 1971]. Zaburzenie w przepływie krwi jest także regulowane przez opór naczyniowy gdzie w tętnicach niskooporowych takich jak tętnica szyjna gdzie przy mniejszych zwężeniach notujemy występowanie istotnych zmian w hemodynamice płynu a w tętnicach wysokooporowych nawet duże zwężenia mogą nie powodować spadku przepływu krwi [May et al. 1963, Moore i Malone 1979].

Bardzo istotną informacją dla klinicysty jest także wielkość kilku występujących po sobie zwężeń zmienionego miażdżycowo naczynia krwionośnego. Według prawa Poiseuille's większe znaczenie ma średnica zwężenia a nie jego długość, na którego wpływ ma głównie lepkość krwi. Obecność dwóch obok siebie zwężeń wymagać będzie usunięcia ich obydwu celem uzyskania normalizacji przepływu krwi [Flanigan et al. 1977, Gauer i Thron 1965].

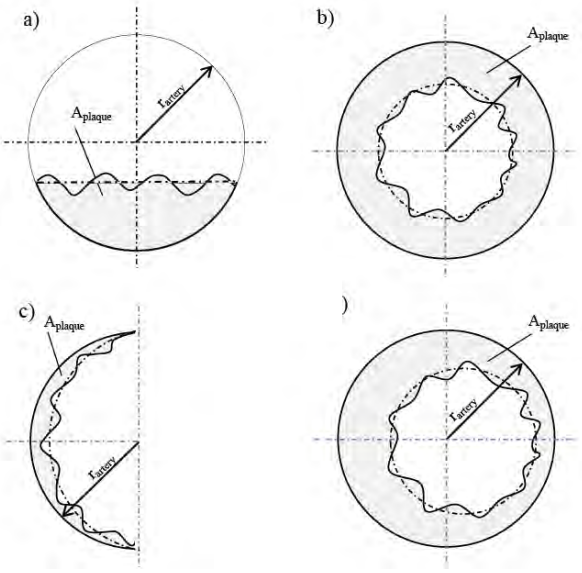
Jednym z mechanizmów obronnych tętnicy przed zmienionymi wartościami prędkości krwi w miejscu zwężenia jest powiększenie się wymiarów tętnicy [Kolodgie et al. 2003, Masawa et al. 1988, Zarins, Xu i Glagov 1996]. Ten proces jest jednak ograniczony i kiedy blaszka miażdżycowa obejmie cały obwód naczynia krwionośnego a światło zwężenia będzie większe niż 40% dalsze powiększenie tętnicy jest już nieefektywne [Glagov et al. 1987].

Istnieją także anatomiczne miejsca układu tętniczego. gdzie rozwój zmian miażdżycowych szybciej przebiega. Należą do nich miejsca rozwidlenia większych tętnic co jest najczęściej efektem występowania krytycznych zmian przepływu wynikających z praw hemodynamiki. Szczególnym takim miejscem jest opuszka tętnicy szyjnej wspólnej która jest bardzo częstym umiejscowieniem blach miażdżycowych [Ravensbergen et al. 1998]. Geometria opuszki tętnicy szyjnej wspólnej jest bardzo

ważnym determinantem występowania hemodynamicznie istotnych zaburzeń przepływu krwi co ma znaczenie w powstawaniu blaszek miażdżycowych w tej okolicy.

Interesującym problemem dla chirurga naczyniowego jest również kształt blaszek miażdżycowych. Każda operacja polegająca na usunięciu zmian miażdżycowych w okolicy tętnicy szyjnej rodzi pytanie, czy kształt złogów ma znaczenie w zaburzeniach przepływu krwi i czy dynamika przyrostu grubości blaszek miażdżycowych zależy od jej kształtu. W niniejszej pracy stworzono teoretyczny model matematyczny przyrostu złogów w czterech wyidealizowanych różnych przypadkach: wzrostu warstwowego, kołowego, soczewkowego i mimośrodowego, rys. 1. Dla tych czterech przypadków został wyznaczony parametr diagnostyczny określający istotne zaburzenia w przepływie krwi.

Rozważmy zatem na gruncie mechaniki płynów określenie wspomnianego parametru diagnostycznego dla przypadków pokazanych na rys. 1.

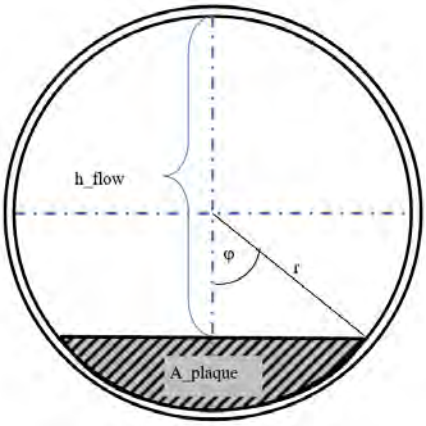


Rys. 1. Charakterystyczne odkładanie się złogów: a) złogi warstwowe, b) złogi kołowe, c) złogi soczewkowe, d) złogi mimośrodowe

2. WZROST WARSTWOWY ZŁOGÓW

Jako parametr diagnostyczny przyjmijmy najpierw zmianę (spadek) wysokości przepływu krwi w tętnicy, rys. 1, do przyrostu pola złogów. Wysokość przepływu

$$h_{flow} = r_{artery}\left(1+\cos\varphi\right),\ \ \varphi \in \langle 0, \pi \rangle \tag{1}$$



Rys. 2. Warstwowy wzrost złogów

natomiast pole złogów

$$A_{plaque} = r_{artery}^2 \left(\varphi - \frac{\sin 2\varphi}{2} \right) \tag{2}$$

pole przepływu krwi wynosi

$$A_{flowł} = \pi r^2 - A_{plaque} = \pi r_{artery}^2 - r_{artery}^2 \left(\varphi - \frac{\sin 2\varphi}{2} \right), \qquad 0 \le \varphi \le \pi \tag{3}$$

stąd ze wzrostem kąta maleje wysokość h_{flow} a rośnie pole złogów co określa I pochodna

$$\frac{dh_{flowł}}{d\varphi} = -r_{artery} \sin\varphi \rightarrow \frac{d\left(h_{flow}/r_{artery}\right)}{d\varphi} = -\sin\varphi \tag{4}$$

$$\frac{d\left(A_{plaque}/A_{artery}\right)}{d\varphi} = \frac{1-\cos 2\varphi}{\pi} \tag{5}$$

$$A_{artery} = \pi r_{artery}^2$$

więc

$$\zeta_h = \frac{d\left(h_{flow}/r_{artery}\right)}{d\left(A_{plaque}/A_{artery}\right)} = -\frac{\sin\varphi}{1-\cos\varphi} \tag{6}$$

$$\lim_{\varphi\to 0}\xi_h = \lim_{\varphi\to\pi}\xi_h = -\infty$$

Na rysunku 3 przedstawiono przebieg zmiany względnej wysokości przepływu $h_{flow}/2r$ do względnej zmiany pola złogów w funkcji A_{plaque}/A_{artery}. W początkowej fazie małym kątom φ odpowiada bardzo silny przyrost złogów co nie ma uzasadnienia fizycznego. Jest to wynikiem nie- uwzględnienia powierzchni tarcia płynu na ściance. Uwzględnienie zjawiska tarcia wynikającego z opływu ścianki płynem uzyskuje się poprzez wprowadzenie promienia hydraulicznego określonego jako stosunek pola przepływu do długości obwodu zwilżania [Ciałkowski (red.) 2015]

$$r_h = \frac{A_{flowł}}{L} \tag{7}$$

i dla koła o promieniu r wynosi

$$r_h = \frac{\pi r^2}{2\pi r} = \frac{1}{2}r, \quad r = 2r_h \tag{8}$$

Dla przypadku pokazanego na rys. 2 długość linii zwilżania wynosi

$$L = 2r\left(\pi - \varphi + \sin\varphi\right), \quad \varphi \in \langle 0, \pi\rangle \tag{9}$$

stąd na podstawie (7) oraz (3) i (9)

$$r_h = \frac{\pi r^2 - r^2\left(\varphi - \dfrac{\sin 2\varphi}{2}\right)}{2r\left(\pi - \varphi + \sin\varphi\right)} = \frac{r}{2}\cdot\frac{\pi - \varphi\dfrac{\sin 2\varphi}{2}}{\pi - \varphi + \sin\varphi}, \quad r = r_{artery} \tag{10}$$

lub w postaci bezwymiarowej

$$\frac{2r_h}{r_{artery}} = \xi = \frac{\pi - \varphi + \dfrac{\sin 2\varphi}{2}}{\pi - \varphi + \sin\varphi} \tag{11}$$

zatem zmiana wielkości $2r_h/r$ w funkcji kąta φ wynosi

$$\frac{d\left(2r_h/r_{artery}\right)}{d\varphi}=\frac{\left(-1+\cos 2\varphi\right)\cdot\left(\pi-\varphi+\sin\varphi\right)-\left(\pi-\varphi+\frac{\sin 2\varphi}{2}\right)\left(-1+\cos\varphi\right)}{\left(\pi-\varphi+\sin\varphi\right)^2} \tag{12}$$

Dzieląc (12) przez (5) mamy

$$\zeta=\frac{d\left(2r_h/r_{artery}\right)}{d\left(A_{plaque}/A_{artery}\right)}=\pi\cdot\frac{\left(-1+\cos 2\varphi\right)\left(\pi-\varphi+\sin\varphi\right)-\left(\pi-\varphi+\frac{\sin 2\varphi}{2}\right)\left(1+\cos\varphi\right)}{\left(1-\cos 2\varphi\right)\cdot\left(\pi-\varphi+\sin\varphi\right)^2},\ 0\le\varphi\le\pi \tag{13}$$

Kątowi $\varphi = 0$ odpowiada początek narastania złogów zaś kątowi $\varphi = \pi$ całkowite wypełnienie tętnicy złogami. Przebieg parametru (6) i (13) przedstawiono na rys. 3. Jak już wspomniano parametr ζ (6) nie odpowiada fizycznemu przebiegowi odkładania się złogów w fazie początkowej (małe wartości kąta φ).

Interpretacja fizyczna parametru diagnostycznego ζ

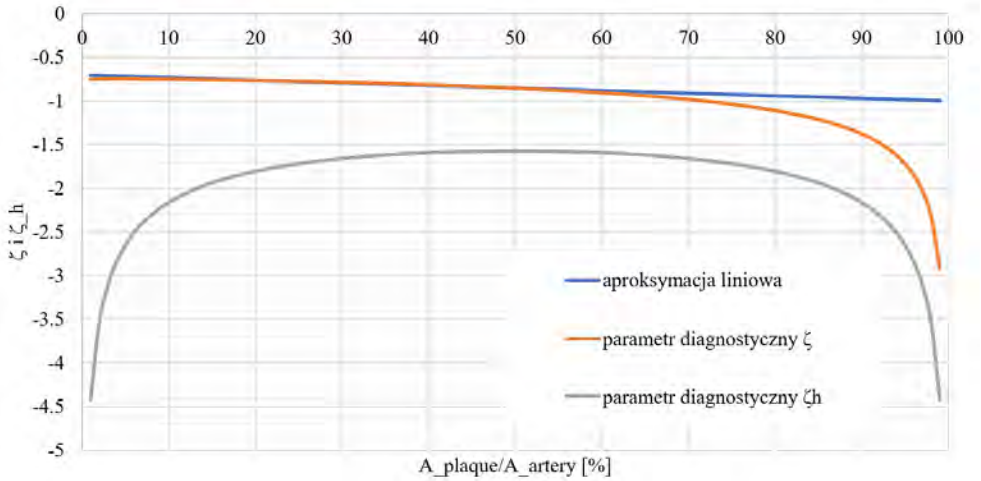
Weźmy pod uwagę bezwymiarowy promień hydrauliczny i niech naprężenia styczne na ściance wywołane przepływem krwi wynoszą τ, wówczas na długości l

$$\xi=\frac{2r_h}{r_{artery}}=\frac{2\pi(2r_h)\cdot l\cdot\tau}{2\pi\cdot r_{artery}\cdot l\cdot\tau}=\frac{\text{siła tarcia przez tętnicę ze złogami}}{\text{siła tarcia przez tętnicę bez złogów}}=\text{względna siła tarcia}$$

więc wielkość ξ oznacza względną siłę tarcia płynu przez tętnicę ze złogami, zaś $d\xi$ oznacza spadek siły tarcia krwi o ścianki zwężonej (przez złogi) tętnicy.

$$\zeta=\frac{d\xi}{d\left(A_{plaque}/A_{artery}\right)}=\frac{d\left(2r_h/r_{artery}\right)}{d\left(A_{plaque}/A_{artery}\right)}=\frac{\text{względny spadek siły tarcia}}{\text{względny przyrost powierzchni złogów}}$$

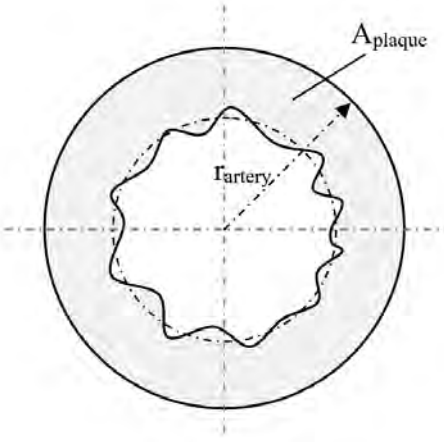
Z rysunku 3 widać, że dla $A_{plaque}/A_{artery} > 60\%$ następuje radykalny spadek parametru ζ co oznacza, że zmniejszaniu się pola przepływu krwi towarzyszy istotny względny spadek siły tarcia krwi o ścianki tętnicy ze złogami. W dalszym ciągu do badania innych kształtów wzrastania złogów będziemy posługiwać się parametrem ζ.



Rys. 3. Przebieg różnych parametrów diagnostycznych dla warstwowego narastania złogów, rys. 1a

3. WZROST KOŁOWY (PIERŚCIENIOWY) ZŁOGÓW

Na rysunku 4 pokazano schemat pierścieniowego przyrostu złogów



Rys. 4. Schemat do obliczeń pierścieniowego wzrostu złogów

Pole złogów pierścieniowych wynosi

$$A_{plaque} = A_{artery} - \pi r^2$$

$$\frac{A_{plaque}}{A_{artery}} = 1 - \frac{\pi r^2}{\pi r_{artery}^2} = 1 - \frac{r^2}{r_{artery}^2}, \quad \xi = \frac{r}{r_{artery}}, \quad \xi \in \langle 0,1 \rangle \tag{14}$$

Promień hydrauliczny r_h

$$r_h = \frac{A_{slow}}{L_m} = \frac{\pi r^2}{2\pi r} = \frac{r}{2}, \quad 2r_h = r, \quad 4r_h = 2r \tag{15}$$

$$2r_h = r / r_{artery}$$

$$\frac{2r_h}{r_{artery}} = \frac{r}{r_{artery}} \tag{16}$$

Stąd przyrost promienia hydraulicznego

$$d\left(\frac{2r_h}{r_{artery}}\right) = \frac{1}{r_{artery}} \cdot dr$$

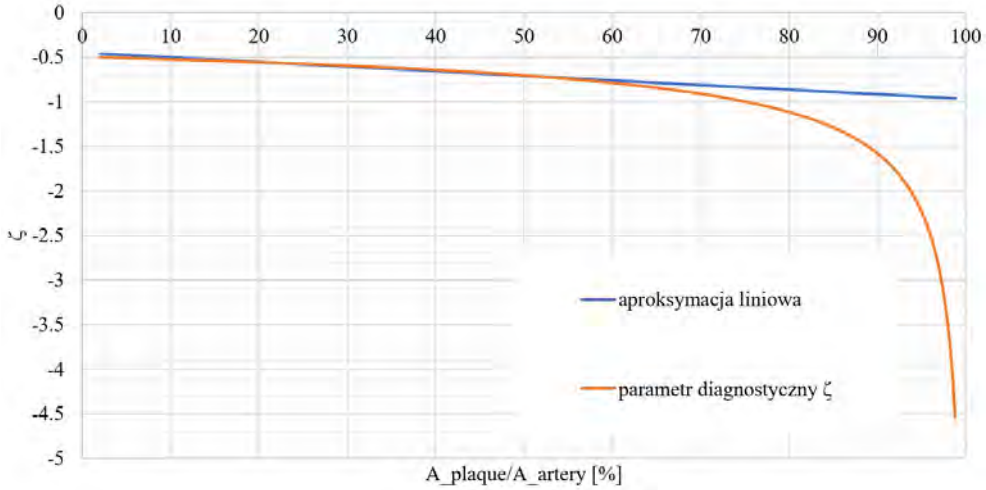
zaś przyrost złogów

$$d\left(\frac{A_{plaque}}{A_{artery}}\right) = -\frac{2r}{r_{artery}^2} dr \tag{17}$$

Zatem spadek względnej siły tarcia wynosi

$$\zeta = \frac{d\left(\frac{2r_h}{r_{artery}}\right)}{d\left(\frac{A_{plaque}}{A_{artery}}\right)} = \frac{d\xi}{d\left(\frac{A_{plaque}}{A_{artery}}\right)} = \frac{\frac{1}{r_{artery}}}{\frac{2r}{r_{artery}^2}} = -\frac{1}{2 \cdot \frac{r}{r_{artery}}} = -\frac{1}{2\frac{2r_h}{r_{artery}}} \xrightarrow{r_h \to 0} -\infty \tag{18}$$

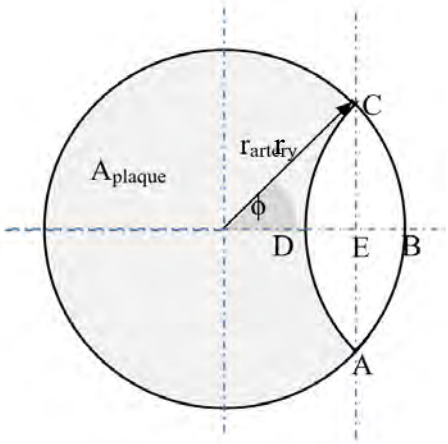
Krzywa (18) jest hiperbolą i jest pokazana na rys. 5.



Rys. 5. Przebieg parametru diagnostycznego ζ dla kołowego wzrostu złogów, rys. 1b. Quasi-liniowy charakter parametru ζ zachodzi w obszarze <10%,60%> pola złogów (odcinek prostej)

4. WZROST SOCZEWKOWY ZŁOGÓW

Dla prostoty rozważań pole złogów przyjęto, jako pole zawarte pomiędzy dwoma przecinającymi się okręgami o tych samych promieniach. Pole przepływu jest określone linią ABCDE. Zauważmy, że pole ABCE jest równe polu AECDA. Pole ABCEA odpowiada warstwowemu wzrostowi złogów, rys. 6.



Rys. 6. Szkic do obliczeń złogów soczewkowych

Całkowite pole złogów wynosi

$$A_{slow} = 2r_{artery}^2 \cdot \left(\varphi - \frac{\sin 2\varphi}{2} \right) \tag{19}$$

$$A_{flow} = A_{artery} - A_{flow} = \pi r_{artery}^2 - 2r_{artery}^2 \cdot \left(\varphi - \frac{\sin 2\varphi}{2} \right) \tag{20}$$

Długość obwodu zwilżania wyznacza linia ABCDE i wynosi

$$L = 2\left(2\varphi \cdot r_{artery}\right) = 4 \cdot \varphi \cdot r_{artery} \tag{21}$$

stąd promień hydrauliczny

$$r_h = \frac{A_{flow}}{L} = \frac{2r_{artery}^2 \cdot \left(\varphi - \frac{\sin 2\varphi}{2} \right)}{4\varphi r_{artery}} = \frac{r_{artery}}{2}\left(1 - \frac{\sin 2\varphi}{2\varphi} \right) \tag{22}$$

stąd

$$\frac{2r_h}{r_{artery}} = 1 - \frac{\sin 2\varphi}{2\varphi} \xrightarrow{\varphi \to 0} 0 \tag{23}$$

Wobec tego przyrost $d\left(2r_h / r_{artery}\right)$ jest równy

$$d\left(\frac{2r_h}{r_{artery}} \right) = -\frac{\cos 2\varphi - \frac{\sin 2\varphi}{2\varphi}}{\varphi} \cdot d\varphi, \quad \varphi \in \left\langle \frac{\pi}{2}, 0 \right\rangle \tag{24}$$

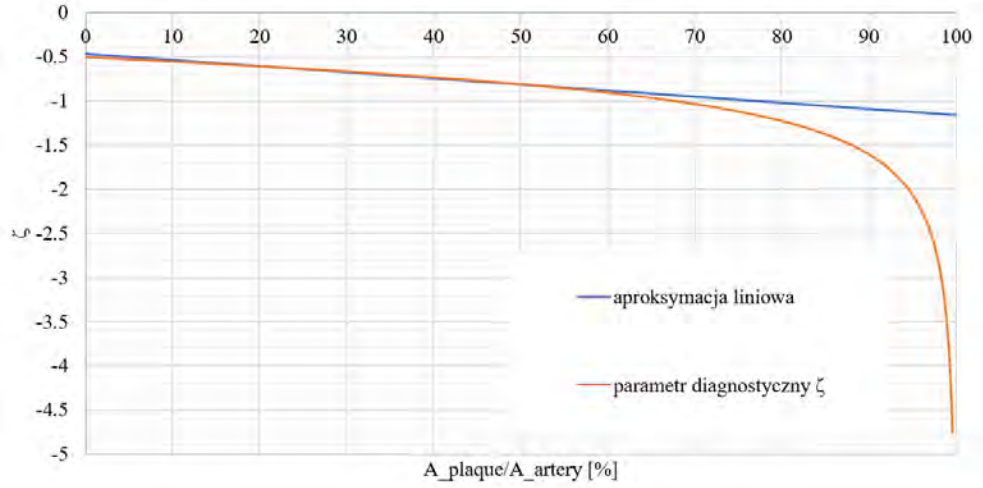
a przyrost $d\left(A_{plaque} / A_{artery}\right)$

$$d\left(\frac{A_{plaque}}{A_{artery}} \right) = d\left(1 - \frac{2}{\pi}\left(\varphi - \frac{\sin 2\varphi}{2} \right) \right) = -\frac{2}{\pi}\left(1 - \cos 2\varphi\right) \cdot d\varphi \tag{25}$$

Zatem

$$\zeta = \frac{d\left(2r_h / r_{artey}\right)}{d\left(A_{plaque} / A_{artery}\right)} = \frac{\pi}{2\varphi} \cdot \frac{\cos 2\varphi - \dfrac{\sin 2\varphi}{2\varphi}}{1 - \cos 2\varphi} \tag{26}$$

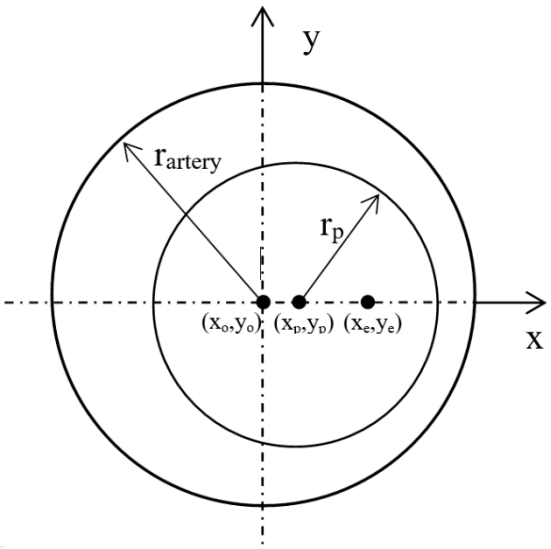
Intensywna zmiana parametry diagnostycznego ζ następuje dla przypadku A_{plaque}/A_{artery} powyżej 60%. W praktyce oznacza to konieczność zabiegu udrażniania tętnicy.



Rys. 7. Przebieg parametru diagnostycznego ζ dla soczewkowego wzrostu złogów, rys. 1c. Quasi-liniowy charakter parametru ζ zachodzi w obszarze <10%,60%> pola złogów (odcinek prostej)

5. WZROST MIMOŚRODOWY ZŁOGÓW

Wyznaczmy przebieg parametru diagnostycznego dla złogów mimośrodkowych.



Rys. 8. Szkic do wyprowadzenia parametru diagnostycznego dla mimośrodowego wzrostu złogów

Na rysunku 8 kolejne promienie wewnętrzne złogu maleją według następującego algorytmu

$$r_p(i) = r_0 - 2x_p(i) \geq 0 \tag{27}$$

gdzie $x_p(i)$ jest środkiem okręgu o promieniu $r_p(i)$, a r_{artery} jest promieniem tętnicy bez złogów

$$x_p(i) = x_0 + \frac{x_e - x_0}{N} \cdot i, \quad i = 0,1,2...,N \tag{28}$$

Ponieważ promień złogu $r_p(i) \geq 0$ przeto dla $i = N$

$$r_p(N) = r_{artery} - 2x_e = 0 \rightarrow x_e = \frac{r_{artery}}{2} \tag{29}$$

gdzie x_e jest współrzędną mimośrodu.
Obwód zwilżania wynosi

$$L_m(i) = 2\pi r_p(i) = 2\pi\left(r_{artery} - 2x_p(i)\right) \tag{30}$$

Pole przepływu

$$A_{flow}(i) = \pi r_p^2(i) = \pi\left(r_{artery} - 2x_p(i)\right)^2, \frac{A_{flow}}{A_{artery}} = \left(1 - \frac{x_p(i)}{r_{artery}}\right), A_{artery} = \pi r_{artery}^2 \tag{31}$$

Pole złogów

$$A_{plaque}(i) = \pi r_{artery}^2 - \pi r_p^2(i) = \pi r_{artery}^2 - \pi\left(r_{artery} - 2x_p(i)\right)^2 \tag{32}$$

$$\frac{A_{plaque}}{Ar_{artery}} = 1 - \left(1 - 2x_p(i)/r_{artery}\right)^2 \tag{33}$$

stąd pierwsza pochodna

$$\frac{dA_{plaque}}{dx_p(i)} = 4\pi\left(r_{artery} - x_p(i)\right)\cdot dx_p(i) \tag{34}$$

Promień hydrauliczny

$$r_h(i) = \frac{A_{flow}(i)}{L_m(i)} = \frac{\pi\left(r_{artery} - 2x_p(i)\right)^2}{2\pi\left(r_{artery} - 2x_p(i)\right)} = \frac{1}{2}\left(r_{artery} - 2x_p(i)\right) \tag{35}$$

stąd pierwsza pochodna

$$\frac{d\left(2r_h(i)\right)}{dx_p(i)} = -2dx_p(i) \tag{36}$$

Zatem parametr diagnostyczny ζ ma postać

$$\zeta = \frac{d\left(2r_h / r_{artery}\right)}{d\left(A_{plaque} / A_{artery}\right)} = \frac{-2d\left(x_p / r_{artery}\right)}{4\left(1 - x_p / r_{artery}\right) \cdot d\left(x_p / r_{artery}\right)} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{1 - x_p / r_{artery}} \tag{37}$$

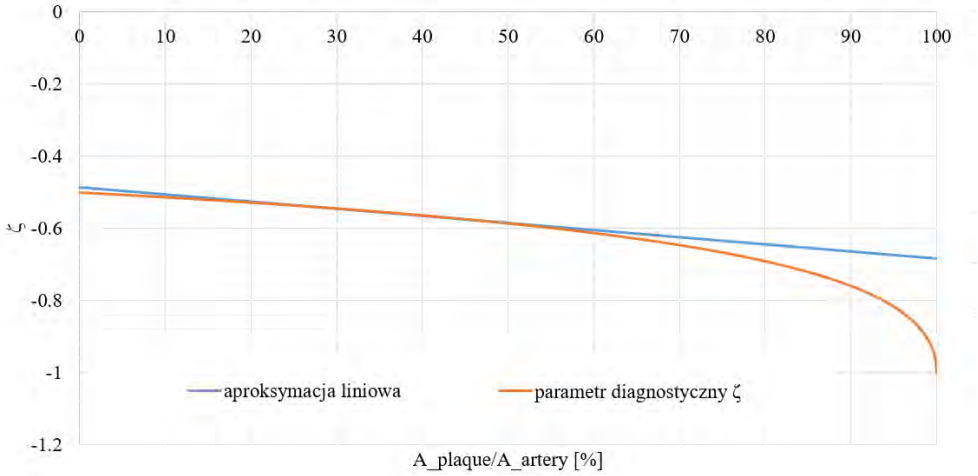
Zależność $\zeta = \zeta(x_p/r_{artery})$ jest krzywą hiperboliczną.
Na podstawie (33) mamy

$$x_p / x_{artery} = \left(1 - \sqrt{1 - A_{plaque} / A_{artery}}\right) / 2 \tag{38}$$

więc podstawiając (38) do (37) otrzymujemy

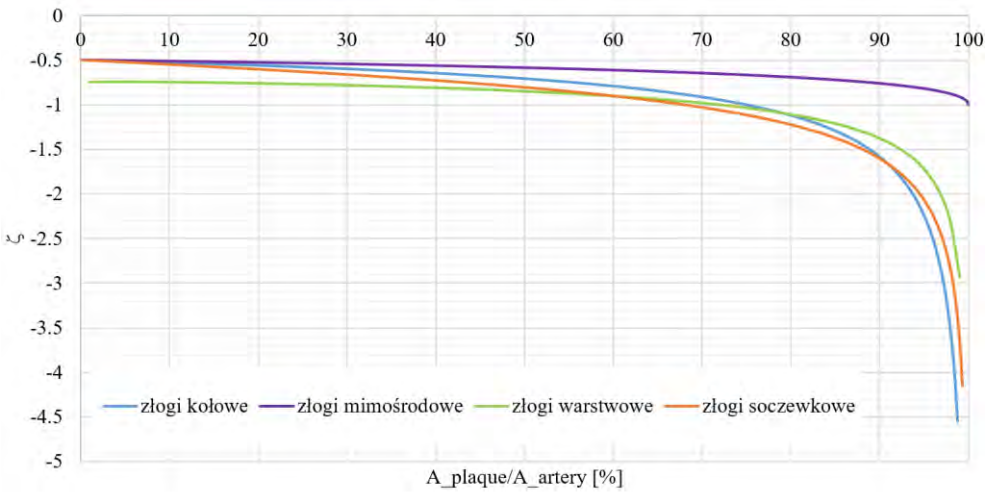
$$\zeta = -\frac{1}{1 + \sqrt{1 - A_{plaque} / A_{artery}}} \tag{37}$$

Przebieg parametru $\zeta = f\left(A_{plaque} / A_{artery}\right)$ przedstawiono na rys. 9



Rys. 9. Przebieg parametru diagnostycznego ζ dla mimośrodowego wzrostu złogów, rys. 1d. Quasi-liniowy charakter parametru ζ zachodzi w obszarze <10%,60%> pola złogów (odcinek prostej)

Na rysunku 10 przedstawiono przebiegi parametru ζ dla omawianych w pracy 4 parametrów diagnostycznych



Rys. 10. Przebieg parametru diagnostycznego ζ w funkcji przyrostu złogów dla omawianych 4 przypadków

Przedstawione rozważania pokazują, że istotne zmiany parametru diagnostycznego ζ zachodzą powyżej 60% powierzchni złogów. Przedstawiony w pracy parametr diagnostyczny ζ ma charakter uniwersalny dla przedstawionych przypadków wzrostu złogów w tym sensie, że w przedziale pola złogów <10%,60%> zmienia się quasi-liniowo zaś powyżej 60% pola złogów jego przebieg jest silnie malejący.

5. PODSUMOWANIE

W pracy przeanalizowano różne formy wzrastania złogów: warstwowe, kołowe, soczewkowe i mimośrodowe stanowiące przybliżenie ich rzeczywistej postaci. Przez wprowadzenie parametru diagnostycznego ζ w funkcji względnego (odniesionego do pola przekroju tętnicy) pola złogów.

Dla wszystkich rozważanych przypadków otrzymano podobny charakter funkcji, to znaczy w zakresie względnego pola złogów w przedziale <10%,60%> charakter parametru ζ w funkcji względnego pola złogów jest quasiliniowy a powyżej 60% ulega silnej zmianie co widać na rys. 3,5,7,9. Okazuje się, że bez względu na kształt złogów i ich geometrię, dochodzi do szybkich i istotnych zmian parametru diagnostycznego przy zwężeniu światła tętnicy powyżej 60%. Ciekawym również spostrzeżeniem z przeprowadzonych obliczeń jest możliwość szybkiego przyrostu zmian miażdżycowych powyżej granicy 60%.

Zwężenie tętnicy szyjnej powyżej 70 % jest aktualnie uznanym stopniem zwężenia, przy którym zarówno u chorych bezobjawowych jak i objawowych należy podjąć decyzję o leczeniu interwencyjnym [ECST Collaborative Group 1991, NASCET Collaborators 2000]. Nie mniej jednak samo istnienie zwężenia często nie jest kluczowym elementem zwiększającym ryzyko wystąpienia udaru mózgu. Okazuje się, że u pacjentów bezobjawowych całkowite 3 letnie ryzyko wystąpienia udaru mózgu wynosi tylko 2,1% [ECST Collaborative Group 1991], a u objawowych wzrasta do ok 13% w ciągu 2 letniej obserwacji [NASCET Collaborators 2000]. Ostatnie dwie dekady przyniosły nowe dowody, które podkreślają istotną rolę morfologii blaszki miażdżycowej, która może być źródłem aktywacji płytkowego mechanizmu tworzenia się skrzeplin a lokalne warunki hemodynamiczne powodują mikrozatorowość, której źródłem jest blaszka miażdżycowa tworząca zwężenie a miejscem docelowym niedokrwiona tkanka mózgowa.

Jak dotąd obliczenia dotyczące hemodynamicznej istotności stopnia zwężenia dotyczyły tylko najwęższego miejsca przepływu krwi przez zmienioną tętnicę. Brak było do tej pory analizy różnych typów złogów miażdżycowych na zmiany w przepływie krwi. Blaszki miażdżycowe tworzą się najczęściej nieregularnie. W pracy przyjęto 4 wyidealizowane geometryczne typy wzrostu zmian miażdżycowych w opuszce tętnicy szyjnej wspólnej. Obliczenia dotyczyły idealnie symetrycznej kołowej tętnicy szyjnej, podczas gdy w wielu przypadkach tętnica może mieć kształt nieregularny. Ponadto przyjęto, że dalszy odcinek tętnicy szyjnej jest prosty, pozbawiony współistniejących złogów miażdżycowych mogących zmieniać warunki hemodynamiczne. Przedstawione przez autorów wyniki obliczeń teoretycznych w następnym kroku będą uzupełnione wpływem kąta rozwidlenia tętnicy na powstawanie blaszek miażdżycowych. Kierunek ten wyznacza praca Kefaytiego i Milnera [Kefayati et al. 2014]] w której wskazano na silny związek geometrii opuszki tętnicy szyjnej wspólnej na zaburzenia w przepływie krwi i wpływ na ewentualne narastanie blaszek miażdżycowych .

Ciekawe spostrzeżenia przedstawił zespół Dawid Steiman i współautorzy, [Steinman et al. 2000] którzy wskazują na to, że geometria blaszki miażdżycowej bywa ekscentryczna lub koncentryczna co może mieć wpływ na zaburzenia w przepływie krwi, gdzie większe ryzyko powikłań zatorowo-zakrzepowych tętnic mózgowych może mieć miejsce w przypadku zwężeń ekscentrycznych [Steinman et al. 2000]. Tłumaczą to zwiększeniem obszarów shear activation w odcinku za zwężeniem. Według innych autorów ma to również związek z brakiem pokrywania się osi przepływu krwi w przewężeniu z osią tętnicy, co nawet pomimo niewielkiej różnicy może być istotną dla przyczyny powstania turbulencji [Kaazempur-Mofrad et al. 2005]. Dotychczasowe przeprowadzone symulacje komputerowe ukazujące większe ryzyko tworzenia się turbulencji w przepływie krwi w ekscentrycznych, nieregularnych blaszkach miażdżycowych wymaga dalszych badań in vitro i in vivo [Tambasco i Steinman 2003]

Przeprowadzone przez autorów rozważania teoretyczne nad stopniem zwężenia tętnicy, wpływu geometrii zwężenia i prędkości przyrostu zmian miażdżycowych na

zaburzenia w przepływie krwi w tętnicy może być istotnym powodem do stworzenia modelu wykorzystania parametru diagnostycznego ζ w badaniach przesiewowych przepływu krwi w tętnicach szyjnych, co pomogło by wyselekcjonować pacjentów u których należy rozważyć szybką interwencję chirurgiczną lub endowaskularną, która zapobiegnie udarowi mózgu. Ważnym kierunkiem badań byłoby także zbadanie wpływu geometrii blaszek miażdżycowych na ryzyko powstania blaszki niestabilnej, która to jest bardzo istotnym czynnikiem ryzyka niedokrwienia mózgu.

LITERATURA

1. Abbot WM, Bouchier-Hayes DJ: The role of mechanical properties in graft design. In Dardik H (ed): Graft Materials in Vascular Surgery. Miami, Symposia Specialist, 1978, p 59.
2. Allwood MJ: Redistribution of blood flow in limbs with obstruction of a main artery. Clin Sci 22:279, 1962.
3. Angelides NS, Nicolaides AN: Simultaneous isotope clearance from the muscle of the calf and thigh. In Puel P, Boccalon H, Enjalbert A(eds): Hemodynamics of the Limbs: 1. Toulouse, GEPESC, 1979, p 547.
4. May AG, Van deBerg L, DeWeede JA, et al: Critical arterial stenosis. Surgery 54:250, 1963.
5. Moore WS, Malone JM: Effect of flow rate and vessel caliber on critical arterial stenosis. J Surg Res 26:1, 1979.
6. Berguer R, Hwang NHC: Critical arterial stenosis: A theoretical and experimental solution. Ann Surg 180:39, 1974.
7. Byar D, Fiddian RV, Queareau M, et al: The fallacy of applying Poiseuille equation to segmented arterial stenosis. Am Heart J 70:216, 1965.
8. Flanigan DP, Tullis JP, Streeter VL, et al: Multiple subcritical arterial stenoses: Effect on poststenotic pressure and flow. Ann Surg 186:663, 1977.
9. Gauer OH, Thron HL: Postural changes in teh circulation. In Hamilton WF, Dow P (eds): Handbook of Physiology, Sect 2: Circulation, Vol III. Washington, DC, American Physiological Society, 1965, p. 2409.
10. Kolodgie FD, Gold HK, Burke AP, et al: Intraplaque hemorrhage and progression of coronary atheroma. N Engl J Med 349:2316, 2003.
11. Masawa N, Glagov S, Bassiouny H, Zarins CK: Intimal thickness normalizes mural tensile stress in regions of increased intimal area and artery size. Arterioscelrosis 8:621a, 1988.
12. Zarins CK, Xu CP, Glagov S: Clinical correlations of atherosclerosis: Aortic disease. In Fuster V (ed): Syndromes of Atherosclerosis: Correlations of Clinical Imaging and Pathology, Armonk, NY, Futura Publishing, 1996, pp 33–42.
13. Glagov S, Weisenberg E, Zarins CK, et al: Compensatory enlargement of human atherosclerotic coronary arteries. N Engl J Med 316:1371, 1987.
14. Ravensbergen J, Ravensbergen JW, Krijger JK, et al: Localizing role of hemodynamics in atherosclerosis in several human vertebrobasilar junction geometries. Arterioscler Thromb Vasc Biol 18:693, 1998.

15. Ciałkowski M.,(Ed.), Fluid Mechanics.Exercises. Publishing House of TU Poznań, pp.640, 2015.
16. European Carotid Surgery Trialists' ECST Collaborative Group. MRC European Carotid Surgery Trial: Interim results for symptomatic patients with severe 70%–99% or with mild 0%–29% carotid stenosis. Lancet 337:1235–1243, 1991.
17. North American Symptomatic Carotid Endarterectomy Trial NASCET Collaborators. Beneficial effect of carotid endar- terectomy in symptomatic patients with high-grade carotid stenosis. N. Engl. J. Med. 325:445–453, 1991.Annals of Biomedical Engineering, Vol. 28, pp. 415–423, 2000.
18. Kefayati S. Milner JS, Holdsworth DW, et al: In vitro shear stress measurements using particle image velocimetry in a family of carotid artery models: effect of stenosis severity, plaque eccentricity, and ulceration. PLoS One. 2014 Jul 9;9(7):e98209. doi: 10.1371/journal.pone.0098209. eCollection 2014.
19. Steinman D.A., Poepping T.L., Tambasco M., et al: Flow Patterns at the Stenosed Carotid Bifurcation: Effect of Concentric versus Eccentric Stenosis. Annals of Biomedical Engineering, Vol. 28, pp. 415–423, 2000.
20. Kaazempur-Mofrad MR, Wada S, Myers JG, Ethier CR (2005) Mass transport and fluid flow in stenotic arteries: Axisymmetric and asymmetric models. Int J Heat Mass Transf 48: 4510–4517.
21. Tambasco M, Steinman DA (2003) Path-dependent hemodynamics of the stenosed carotid bifurcation. Ann Biomed Eng 31: 1054–1065.

PHYSICAL FOUNDATIONS FOR THE SELECTION OF DIAGNOSTIC PARAMETERS OF ATHEROSCLEROTIC PLAQUE GROWTH

Abstract

Carotid artery stenosis is a significant cause of cerebral ischemia. The narrowing percentage of the artery cross-sectional area, causing substantial hemodynamic blood flow disorder, is a significant factor to determine the increased risk of a stroke. Four idealized forms of atherosclerotic plaque growth were analyzed in order to establish the diagnostic parameter determining significant blood flow disorders. The parameter expresses the ratio of relative friction force reduction and relative concretion area increase. The laminar plaque growth was analyzed, followed by analysis of circular, lens and eccentric growth. Apparently, disregarding the shape and geometry of plaque, fast and substantial changes of the diagnostic parameter occur with stenosis above 60% of the artery lumen. An interesting observation based on the calculations is the possibility of fast growth of atherosclerotic lesions above the 60% limit.

Keywords: plaque, lesions, atherosclerosis, diagnostic parameter, plaque shape

Bartosz CIUPEK*
Radosław JANKOWSKI
Karol GOŁOŚ

ANALIZA ZAMIENNOŚCI PALIW STAŁYCH W ASPEKCIE OGRANICZENIA ZAPYLENIA POWIETRZA W POLSCE

W artykule zaprezentowano wyniki badań nad wpływem zamienności paliw stałych do celu ograniczenia emitowanych pyłów z procesów spalania. Analizę przeprowadzono dla obszaru Polski. Przeanalizowano jakość powietrza w okresie 2000–2020. W czasie tym w Polsce dokonano wielu zmian legislacyjnych i prawnych dotyczących urządzeń spalających paliwa stałe oraz związane z tym ilości emitowanych zanieczyszczeń. Zbadano czy wprowadzone zmiany przyczyniły się do polepszenia jakości powietrza. Pokazano wpływ spalania wybranych rodzajów paliw stałych na ilość emitowanych pyłów (PM). Dokonano analizy również innych wybranych substancji szkodliwych takich jak: tlenek węgla (CO), tlenki azotu (NO_x) i lotne związki organiczne (LZO). W podsumowaniu przeprowadzonych badań wskazano kierunki dalszych działań mających na celu poprawę jakości powietrza w Polsce.

Słowa kluczowe: paliwa stałe, pył zawieszony, emisja, substancje szkodliwe

1. WPROWADZENIE

W okresie ostatnich 20 lat można zaobserwować nieznaczną poprawę jakości powietrza w Polsce. Wpływ na to mają szeroko propagowane programy edukacyjne i modernizacja domowych systemów ciepła. Ponadto ważnym elementem działań na rzecz poprawy jakości powietrza jest wprowadzanie do obrotu nowoczesnych kotłów grzewczych, w tym kotłów na paliwo stałe, zgodnych z dyrektywą w sprawie ekoprojektu [Rozporządzenie…, 21.07.2015] i normy [PN-EN 303-5:2012]. Niestety ogrzewanie domów przy wykorzystaniu kotłów na paliwa stałe, ze względu na niewłaściwe spalanie paliw stałych [Ciupek 2019], nadal pozostaje głównym źródłem

* Zakład Paliw i Energetyki Odnawialnej, Instytut Energetyki Cieplnej, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Poznańska

zanieczyszczenia powietrza w Polsce. Jedną z metod ograniczania smogu jest wprowadzenie bazy danych domowych kotłów grzewczych oraz coraz częstsze monitorowanie jakości powietrza oparte na wykrywaniu stężenia cząstek stałych w powietrzu [Gołoś et al. 2021]. Działania te nie wpływają bezpośrednio na poprawę jakości powietrza. Służą one wyłącznie do celów monitoringu i informacji. Potwierdzają to cztery raporty dotyczące jakości powietrza w Polsce oraz wysoka liczba polskich miast w statystykach europejskich o najgorszej jakości powietrza [Ciupek et al. 2021]. Według pracy [Ciupek i Bartoszewicz 2019] około 90% całkowitej emisji $PM_{2.5}$ i PM_{10} pochodzi z indywidualnego ciepłownictwa. Emisja cząstek stałych ma duży wpływ na infekcje układów: oddechowego i sercowo-naczyniowego [World Health Organization..., 2013]. Problem zanieczyszczenia powietrza w Polsce wynika z faktu nadal dużego udziału w sektorze ogrzewnictwa indywidualnego paliw stałych (głównie węgla kamiennego i biomasy drzewnej). W 2018 r. według danych GUS prawie 36% polskich gospodarstw domowych było ogrzewanych kotłami grzewczymi na paliwo stałe [Gołoś et al. 2021], a około 50% wolnostojących gospodarstw domowych jest ogrzewanych paliwami stałymi z uwzględnieniem innych źródeł ciepła. Szacuje się, że niska jakość powietrza w Polsce odpowiada za około 2,5 tys. ofiar śmiertelnych rocznie [Ciupek et al. 2021]. Badacze skupiają się również na zmniejszeniu zużycia energii wykorzystywanej do ogrzewania budynków.

Autorzy niniejszej pracy od wielu lat prowadzą badania nad poprawą parametrów emisyjnych i energetycznych urządzeń cieplnych [Ciupek et al. 2019]. Niestety zmieniające się w ostatnim czasie wymagania co do parametrów nowo projektowanych urządzeń nie powodują znaczącej poprawy jakości powietrza. W Polsce, analizując skuteczność różnych programów modernizacyjnych, nie zaobserwowano znaczącej poprawy jakości powietrza przy zastępowaniu paliw kopalnych niskiej jakości węglem wysokoenergetycznym [Ciupek, Janeba-Bartoszewicz i Urbaniak 2019]. Na Litwie problem ten został rozwiązany, gdy wdrożono udaną transformację polegającą na zastąpieniu paliw kopalnych odnawialnymi źródłami energii. W latach 90 na Litwie ok. 25% gospodarstw nadal używało węgla jako głównego paliwa. W 2012 r. zużycie węgla na Litwie wyniosło zaledwie ok. 2% całkowitej zużytej energii i dominujący sposób ogrzewania stanowiły biopaliwa stałe, z udziałem ok. 35% biomasy [Gołoś et al. 2021].

Z przeprowadzonej analizy literatury wynika, że optymalną sytuacją byłoby, gdyby wszystkie kotły grzewcze na paliwa stałe w Polsce pracowały przez cały okres z mocą nominalną, czyli maksymalną dla danego urządzenia. Z przeprowadzonych badań wynika, że praca kotła grzewczego przy mocy nominalnej zapewnia jego najwyższą sprawność i najmniejszą jednostkową emisję zanieczyszczeń [Ciupek i Gołoś 2020]. Rzeczywiste warunki, w jakich pracują kotły grzewcze, odbiegają od zakładanych dla mocy nominalnych danego urządzenia. Na odchylenia te mają wpływ: warunki pogodowe, jakość paliwa, regulacja procesu spalania i jego precyzja oraz parametry techniczno-eksploatacyjne kotłów grzewczych. W rzeczywistości mnogość różnych parametrów łącznie wpływających na pracę kotła powoduje, że większość urządzeń

grzewczych pracuje na nieoptymalnym poziomie. Przekłada się to na złe parametry pracy kotłów grzewczych, takie jak wysoka emisja zanieczyszczeń i zwiększone zużycie paliwa. Znane obecnie metody ograniczania emisji cząstek stałych ze spalania paliw stałych w postaci filtrów cząstek stałych [Ciupek, Gołoś i Bartoszewicz 2021] pozwalają na redukcję emisji do dopuszczalnego poziomu, ale nie działają na przyczynę powstawania i emitowania z urządzeń grzewczych pyłu.

Jednym z elementów, które mogą poprawić jakość powietrza w Polsce, bez znaczącej ingerencji w rzeczywistą eksploatację kotłów grzewczych małej mocy, jest zmiana źródła energii z paliw pierwotnych (węgiel kamienny czy brunatny) na paliwa o mniejszej emisji pyłów (np. biomasowe). Do aktualnych kierunków transformacji energetyki indywidualnej należą badania nad zamiennością paliw stałych w celu ograniczania emisji substancji szkodliwych do środowiska. Za paliwa stałe o mniejszym udziale pyłów w emitowanych spalinach uważa się paliwa biomasowe. W ostatnich latach najpopularniejszym typem biomasy spalanym w indywidualnych źródłach ciepła była biomasa drzewna w postaci granulatu, nazywana pelletem drzewnym. Zastosowanie biomasy w postaci pelletu pozwala wykorzystać analogiczne konstrukcje kotłów grzewczych jak w przypadku spalania paliw węglowych, jedynie zmieniając system podawania i spalania paliwa dedykowany dla pelletów. Kolejnymi zaletami zastosowania biomasy speletyzowanej są: łatwość transportu i przechowywania paliwa, drobna frakcja paliwa ułatwia spalanie w palniku, wstępna utrata wilgoci wykorzystanego wsadu i podniesienie wartości opałowej finalnego paliwa, niewielka zawartość siarki pierwiastkowej w biomasie oraz wysoka gęstość usypowa. Aktualnie prowadzone badania mają na celu sprawdzenie zasadności stosowania innego rodzaju wsadów biomasowych w peletyzacji paliw w odróżnieniu do biomasy drzewnej. Jako główne wskaźniki zasadności zastosowania innych rodzajów biomasy niż drzewna są: kaloryczność paliwa, trwałość granulatu oraz emisja substancji szkodliwych z ich spalania. Pod uwagę również wzięto: występowanie danego rodzaju biomasy niedrzewnej, sposób jej pozyskania oraz możliwość jednoczesnego zagospodarowania odpadów biomasowych wcześniej niestosowanych w ogrzewnictwie indywidualnym. Otrzymane wyniki badań porównano z parametrami cieplno-emisyjnymi otrzymywanymi z stałych paliw kopalnych [Ciupek 2020, Ciupek et al. 2021] oraz biomasy drzewnej [Ciupek i Gołoś 2020].

2. JAKOŚĆ POWIETRZA W POLSCE W LATACH 2000–2020

Pierwszym elementem badań była analiza stężeń substancji szkodliwych w powietrzu w latach 2000–2020 związana z procesem zmian legislacyjnych i wymiany kotłów grzewczych na paliwa stałe w ramach programów dotacyjnych. W ramach analizy jakości powietrza w Polsce, wybrano stacje pomiarowe dla czterech

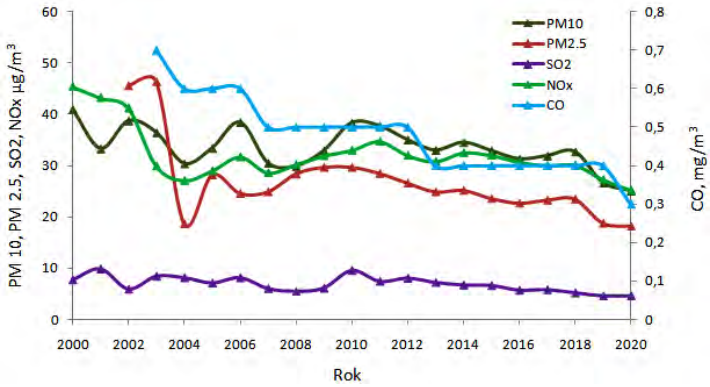
znacząco oddalonych od siebie lokalizacji w Polsce. Lokalizację i rodzaj stacji przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Lokalizacja i rodzaj stacji pomiarowej

Lokalizacja	Kod stacji pomiarowej	Adres stacji
Bydgoszcz	PL0252A	Pl. Poznański
Lublin	PL0507A	ul. Obywatelska
Zielona Góra	PL0213A	ul. Krótka
Warszawa	PL0140A	al. Niepodległości

Wszystkie powyższe lokalizacje były stacjami umożliwiającymi automatyczny pomiar i rejestrację poziomu zanieczyszczeń wybranych substancji szkodliwych: CO, NOx, SO_2, $PM_{2.5}$ i PM_{10} w latach 2000–2020 z krokiem godzinowym. W celu określenia emisji zanieczyszczeń w analizowanym mieście wyniki pomiarów emisji poszczególnych zanieczyszczeń uśredniano do wartości rocznej, a następnie uśredniono dla wszystkich analizowanych lokalizacji. Zmianę emisji wybranych substancji szkodliwych w latach 2000–2020 pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Emisja wybranych substancji szkodliwych w Polsce (lata: 2000–2020) [Gołoś et al. 2021]

Z badań [Gołoś et al. 2021] wynika, że głównym źródłem zanieczyszczenia powietrza w Polsce jest sektor ogrzewnictwa indywidualnego oparty o nieprawidłowo eksploatowane kotły grzewcze na paliwa stałe. W analizowanym okresie stężenia tlenków azotu (NO_x) oscylowały w przedziale 25,2–45,4 µg/m^3, w przypadku ditlenku siarki (SO_2) odnotowano przedział 4,6–9,8 µg/m^3, z kolei dla tlenku węgla (CO) był to zakres 0,3–0,7 mg/m^3. Wyniki stężeń dla PM_{10} mieściły się w przedziale 25,1–40,9 µg/m^3, a $PM_{2.5}$ w zakresie 18,1–46,3 µg/m^3. Roczne emisje w latach 2000-2010 charakteryzowały się wysoką i niestabilną zmiennością. Okres 2010-2012

można uznać za okres stabilizacji, a wartości stężeń substancji szkodliwych w powietrzu wykazały niewielką tendencję spadkową. Wynikała ona z faktu pojawienia się pierwszych certyfikatów emisyjnych i świadectw ekologiczności. W okresie 2012-2020 zauważalna jest stała tendencja spadkowa, co związane jest z wprowadzeniem zaostrzonych wymogów emisyjnych oraz wdrożeniem programu wymiany nieekologicznych kotłów grzewczych [Ciupek et al. 2021]. Badania pokazały, że z roku na rok sytuacja związana z jakością powietrza poprawia się, jednak poprawa ta nie jest spektakularna i trudno doszukać się w niej świadomego działania mającego na celu ograniczenie ilości emitowanych substancji szkodliwych. Powodów tego stanu upatrywać można w: złych nawykach eksploatacyjnych użytkowników kotłów grzewczych, dalszego wykorzystywania węgla kamiennego w krajowym ogrzewnictwie indywidualnym oraz skupieniu się branży kotlarskiej wyłącznie na badaniach legalizacyjnych aktualnie produkowanych kotłów, bez wdrożenia nowoczesnych konstrukcji spalających paliwa alternatywne.

Analizując wyniki badań widać, że indywidualne ogrzewnictwo oparte o kotły na paliwa stałe jest główną przyczyną złej jakości powietrza w Polsce, jednak z upływem lat zaobserwować można poprawę jakości powietrza. Na przestrzeni ostatnich 20 lat można zaobserwować spadek ilości emitowanych substancji szkodliwych w Polsce, chociaż fakt jego niskiej jakości jest tematem nadal poruszanym w dyskusji publicznej. Jak widać dotychczas prowadzone działania wpłynęły nieznacznie na poprawę stanu powietrza, a jego poprawa przy aktualnie stosowanych działaniach obarczona jest dłuższą reakcja w czasie. Potwierdzać ten fakt mogą raporty o jakości powietrza w Polsce oraz duża ilość miast Polskich będąca w europejskich statystykach miejscami o najgorszej jakości powietrza w Europie.

3. ANALIZA ZAMIENNOŚCI PALIW STAŁYCH

3.1. Analiza techniczna wybranych paliw

W badaniach wykorzystano następujące paliwa stałe: węgiel kamienny typu płomienny sortymentu groszek (WK1), węgiel kamienny typu gazowo-płomienny sortymentu groszek (WK2), węgiel brunatny subbitumiczny sortymentu groszek (WB) oraz pellety z drewna sosnowego (PS), lucerny (PL) i słomy żytniej (PŻ). W celu określenia parametrów technicznych paliw wykonano ich analizę techniczną zgodnie z normami: [PN-G–04611:2020-06, PN-ISO 1171:2002, PN-ISO 562:2000, PN-EN ISO 18134-2:2017-03, PN-EN ISO 18122:2016-01, PN-EN ISO 18123:2016-01]. W ramach analizy technicznej określono również ciepło spalania każdego z wykorzystanych paliw metodą spalania w bombie kalorymetrycznej oraz wyliczono wartość opałową każdego paliwa w stanie roboczym. Badania wykonano zgodnie

z metodą opisaną w normie [PN-ISO 1928:2020-05]. Otrzymane wyniki z badań przedstawiono w tabeli 2.

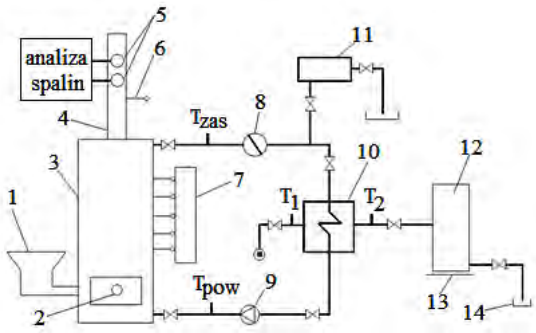
Tabela 2

Analiza techniczna wybranych paliw stałych

	Wilgotność	Części lotne	Popiół	Ciepło spalania	Wartość opałowa
	[%]			[MJ/kg]	
(WB)	6,93	47,41	9,26	27,34	26,14
(WK1)	5,94	42,67	4,00	29,06	27,88
(WK2)	3,67	39,57	6,60	30,22	29,09
(PS)	6,93	52,40	5,55	18,47	16,56
(PL)	10,89	59,15	9,90	16,01	13,87
(PŻ)	9,00	62,45	11,60	14,94	12,81

3.2. Emisja substancji szkodliwych z wybranych paliw stałych

Obiektem badawczym wykorzystanym w eksperymentach była cylindryczna komora spalania o mocy znamionowej 15 kW. Średnica komory spalania wynosiła 900 mm, a wysokość 2000 mm. Komora spalania wyposażona była w czopuch o średnicy 250 mm. Komora spalania zaopatrzona została w cylindryczny, żeliwny deflektor o średnicy 220 mm zlokalizowany nad wieńcem paleniska palnika retortowego w odległość ok. 250 mm. Pomiar zawartości tlenu oraz stężeń masowych substancji szkodliwych wykonano zespołem analizatorów spalin Testo 330-2 LL oraz Testo 380 który był wyposażony w fotochemiczne cele pomiarowe. Zebrane wartości emisji przeliczono w odniesieniu do 10% tlenu w spalinach suchych. Czas analizy ustalono jako jedno próbkowanie na pięć sekund, wynikające z zaleceń producenta aparatury pomiarowej. Dokładność pomiaru O_2 wynosiła ±1%, CO wynosiła ±5 ppm, dla NOx ±3 ppm, a dla PM wynosiła ±5 mg/m^3. Czas poboru jednorazowej próbki spalin trwał 30 min. Do pomiaru temperatur wykorzystano pięć termopar typu K (NiCr-Ni) o zakresie pomiarowym od –200°C do +1370°C i błędzie pomiarowym ±1°C w przedziale temp. 400–900°C. Strata ciepła z instalacji grzewczej do otoczenia wynosiła ok. 1,5 kW. Za odbiór ciepła wytworzonego w procesie spalania zachodzącym w komorze spalania odpowiedzialny był układ czterech płytowych wymienników ciepła o łącznej mocy 200 kW. Strumień przepływającej wody chłodzącej przez wymienniki był tak wyregulowany aby odbierały one ok. 15 kW mocy cieplnej odpowiadające znamionowej mocy komory badawczej. Schemat stanowiska badawczego wraz z opisem pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego

Objaśnienie: 1 – zasobnik paliwa z palnikiem, 2 – okno rewizyjne kontroli płomienia, 3 – komora spalania, 4 – komin pomiarowy, 5 – zespół analizatorów spalin do rejestracji: tlenu, tlenku węgla, tlenków azotu i zapylenia spalin, 6 – pomiar temperatury spalin, 7 – układ termopar do pomiaru rozkładu temperatur wewnątrz komory spalania, 8 – przepływomierz (licznik energii), 9 – pompa obiegowa, 10 – układ wymienników ciepła, 11 – naczynie wyrównawcze, 12 – zbiornik wodny, 13 – waga, 14 – zrzut wody chłodzącej.

Badania podzielono na sześć etapów. W pierwszych trzech etapach zbadano emisję substancji szkodliwych podczas spalania paliw węglowych, natomiast w trzech ostatnich etapach zbadano emisję substancji szkodliwych ze spalania paliw biomasowych. Każdy z etapów badawczych trwał ok. 2h w trakcie których rejestrowano w sposób ciągły parametry cieplne komory spalania oraz wykonano kilkanaście prób analizy spalin. W tabelach 3 i 4 zaprezentowano wyniki badań dla poszczególnego rodzaju paliwa.

Tabela 3

Parametry cieplno-emisyjne przy spalaniu paliw węglowych

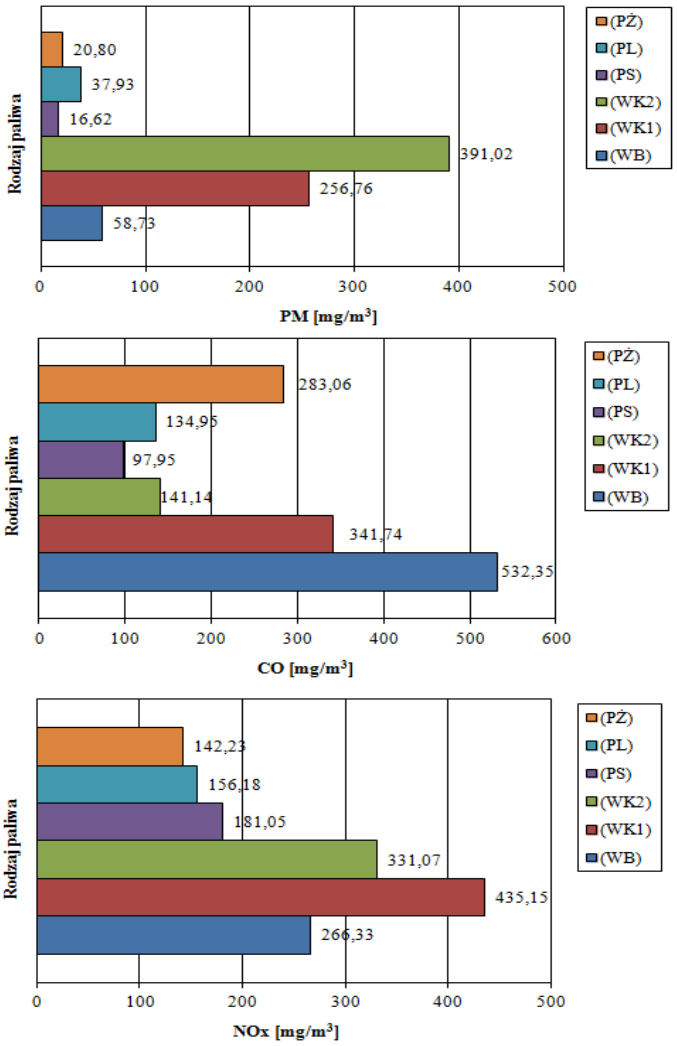
Rodzaj paliwa	PM	CO	NO_x	LZO	O_2	Temp. spalin
	[mg/m³]			[ppm]	[%]	[°C]
(WB)	58,73	532,35	266,33	155,39	12,40	241,08
(WK1)	256,76	341,74	435,15	10,69	11,14	238,76
(WK2)	391,02	141,14	331,07	9,43	10,66	240,56

Tabela 4

Parametry cieplno-emisyjne przy spalaniu paliw biomasowych

Rodzaj paliwa	PM	CO	NO_x	LZO	O_2	Temp. spalin
	[mg/m³]			[ppm]	[%]	[°C]
(PS)	16,62	97,95	181,05	22,88	13,65	143,70
(PL)	37,93	134,95	156,18	22,93	14,47	83,54
(PŻ)	20,80	283,06	142,23	24,63	15,81	79,28

Na rysunkach 3 przedstawiono graficznie różnicę w emisji wybranych substancji szkodliwych dla zbadanych paliw stałych.



Rys. 3. Emisja wybranych substancji szkodliwych dla zbadanych paliw

4. PODSUMOWNIE I WNIOSKI

Na podstawie zrealizowanych prac badawczych można zaobserwować, że wpływ na jakość powietrza w Polsce ma w dużej mierze sektor ogrzewnictwa

indywidualnego. Można uznać, że rzeczywista eksploatacja kotłów grzewczych małej mocy wpływa znacząco na jakość powietrza. Związane jest to z emisją substancji szkodliwych z procesów spalania paliw stałych. Przeprowadzone badania i późniejsza ich analiza jednoznacznie pokazują, że przyczyny tak wysokiego zanieczyszczenia środowiska naturalnego należy dopatrywać się w ciągłym wykorzystaniu stałych paliw kopalnych na cele energetyczne. Widzimy wyraźną korelację poprawy jakości powietrza do procesu wprowadzania nowych norm emisyjnych i nasilonej wymiany kotłów w ostatnich latach. Niestety, Polska jak większość krajów europejskich nie jest w stanie całkowicie zrezygnować z zastosowania paliw stałych w energetyce zwłaszcza ogrzewnictwie indywidualnym.

Przeprowadzone badania pokazują, że paliwa stałe biomasowe mogą w przyszłości przyczynić się do utrzymania sektora indywidualnego ogrzewnictwa opartego na spalaniu paliw stałych. Proces ten będzie realizowany przy nieznacznym oddziaływaniu indywidualnych źródeł ciepła opalanych tymi paliwami na powietrze i środowisko ze względu na znacząco mniejszą emisję substancji szkodliwych do środowiska, a w szczególności pyłów zawieszonych. W przypadku emisji tlenku węgla oraz tlenków azotu również obserwowana jest znacznie mniejsza emisja substancji szkodliwych. W krajach Europy zachodniej w których udział paliw biomasowych w sektorze ogrzewnictwa indywidualnego jest znacząco wyższy niż stałych paliw kopalnych, zanieczyszczenie powietrza jest widocznie niższe niż w Polsce [Ciupek et al. 2021, Gołoś et al. 2021].

Przyczyny złej jakości powietrza w Polsce należy upatrywać w złych nawykach wśród użytkowników kotłów grzewczych na paliwa stałe oraz przywiązaniu tej grupy społecznej do spalania paliw węglowych. Zakłada się, że wprowadzane zmiany legislacyjne, wyłączenia z użytkowania kopalnych paliw pierwotnych oraz dalsze prowadzenie akcji edukacyjnych i promujących niskoemisyjne źródła ciepła w kolejnych latach powinno przyczynić się do poprawy jakości powietrza w Polsce. Jedną z możliwości dalszego rozwoju i utrzymania sektora ogrzewnictwa indywidualnego opartego na spalaniu paliw stałych, będzie zamiana paliw kopalnych na odnawialne paliwa biomasowe. Z przeprowadzonych badań wynika, że nie tylko biomasa drzewna ale też niedrzewna powinna być rozpatrywana jako potencjalne źródła energii dla ogrzewnictwa indywidualnego.

Podsumowując, problem jakości powietrza w Polsce nadal wymaga wzmożonych działań mających na celu ograniczenie ilości emitowanych substancji szkodliwych. Przedstawione propozycje zamienności paliw kopalnych na odnawialne paliwa biomasowe powinno przyczynić się do poprawy jakości powietrza w Polsce na przestrzeni najbliższych lat.

LITERATURA

1. Ciupek B., 2019, Wpływ pary wodnej dostarczanej do procesu spalania węgla kamiennego na skład chemiczny spalin, Przemysł Chemiczny, nr 11, T. 98 s. 1768–1772,
2. Gołoś K., Ciupek B., Judt W., Urbaniak R., 2021, Wpływ wymiany kotłów grzewczych opalanych paliwem stałym na jakość powietrza w Polsce w latach 2000-2020, Przemysł Chemiczny, nr 5, T. 100 s. 486–489,
3. Ciupek B., Judt W., Gołoś K., Urbaniak R., 2021, Analysis of low-power boilers work on real heat loads: A case of Poland, Energies, vol. 14, no. 11, s.3101–1–13,
4. Ciupek B., Bartoszewicz J., 2019, The influence of geometry of primary air channels in standard retort burners on dust emission, MATEC Web of Conferences, vol. 254, s. 04009–1–04009–11,
5. Ciupek B., Judt W., Urbaniak R., Kłosowiak R., 2019, The Emission of Carbon Monoxide and Nitrogen Oxides from Boilers Supplied by a Pellet under the Influence of Changes in the Air–Fuel Equivalence Ratio, Journal of Ecological Engineering, nr 20, T. 10 s. 34–38,
6. Ciupek B., Janeba–Bartoszewicz E., Urbaniak R., 2019, Wpływ rozdrobnienia i zwiększonej wilgotności paliw węglowych na skład chemiczny spalin, Przemysł Chemiczny, nr 8, T. 98 s. 1283–1285,
7. Ciupek B., Gołoś K., 2020, Concentration of Nitrogen Oxides when Burning Wood Pellets of Various Origins, Journal of Ecological Engineering, nr 21, T. 5 s. 229–233,
8. Ciupek B., Gołoś K., Bartoszewicz J., 2021, Wpływ układu filtracyjno-katalitycznego na parametry emisyjne kotłów małej mocy zasilanych pelletem drzewnym, Przemysł Chemiczny, nr 3, T. 100 s. 221–224,
9. Ciupek B., 2020, Badanie procesu spalania węgla kamiennego w kotłach grzewczych wyposażonych w parową komorę dopalania, Przemysł Chemiczny, nr 8, T. 99 s. 1163–1168,
10. Ciupek B., Gołoś K., Jankowski R., Nadolny Z., 2021, Effect of Hard Coal Combustion in Water Steam Environment on Chemical Composition of Exhaust Gases, Energies, vol. 14, no. 20, s.6530–1–24,
11. PN-EN 303-5:2012, Kotły grzewcze na paliwa stałe z ręcznym i automatycznym zasypem paliwa o mocy do 500 kW.
12. PN-G–04611:2020-06, Węgiel kamienny, koks i półkoks z węgla kamiennego oraz karbonizat, Oznaczanie zawartości wilgoci, Metody uproszczone.
13. PN-ISO 1171:2002, Paliwa stałe, Oznaczanie popiołu.
14. PN-ISO 562:2000, Węgiel kamienny i koks, Oznaczanie zawartości części lotnych.
15. PN-EN ISO 18134-2:2017-03, Biopaliwa stałe, Oznaczanie zawartości wilgoci, Metoda suszarkowa, Część 2: Wilgoć całkowita, Metoda uproszczona.
16. PN-EN ISO 18122:2016-01, Biopaliwa stałe, Oznaczanie zawartości popiołu.
17. PN-EN ISO 18123:2016-01, Biopaliwa stałe, Oznaczanie zawartości części lotnych.
18. PN-ISO 1928:2020-05, Paliwa stałe, Oznaczanie ciepła spalania metodą spalania w bombie kalorymetrycznej i obliczanie wartości opałowej.

19. Rozporządzenie Komisji (UE) 2015/1189, w sprawie wykonania dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/124/WE w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu dla kotłów na paliwo stałe (Dz. U. L 193 z 21.07.2015).
20. World Health Organization, 2013, Health effects of Particulate Matter, Policy Implications for Countries in Eastern Europe, Caucasus and Central Asia, Kopenhaga, Dania.

ACKNOWLEDGEMENTS

Praca wykonana w ramach Dotacji Statutowej, Politechniki Poznańskiej. Projekt badawczy: Analiza procesów termodynamicznych zachodzących w kotłach oraz piecach przemysłowych, nr: 0712/SBAD/5202.

ANALYSIS OF SUPPORTATION OF SOLIDERS IN THE ASPECT OF RETURNING AIR POLLINATION IN POLAND

Abstract

The paper presents the results of a study investigating the effects of substitutability of solid fuels on the target of reducing emissions of dust. The analysis was carried out for the territory of Poland. Air quality was analysed for the period 2000-2020. During this period, numerous legislative and legal changes have been made in Poland with regard to equipment for the combustion of solid fuels and the quantities of pollutants associated with them. It was assessed whether the changes have contributed to improving air quality. The effects of combustion of selected solid fuels on dust emissions are shown. Other selected pollutants such as carbon monoxide, nitrogen oxides and volatile organic compounds were also investigated. The summary of the studies carried out provided guidelines for further action to improve air quality in Poland.

Keywords: solid fuels, particulate matter, emissions, pollutants

Krzysztof CUR*
Grzegorz WELTROWSKI**

METODY WSPOMAGANIA DECYZJI W KALKULACJI STRATEGICZNEJ DLA INFRASTRUKTURY KRYTYCZNEJ

Zastosowanie sztucznej sieci neuronowej jako metody wspomagania w kalkulowaniu może wykazać, że jest ona skutecznym narzędziem do prognozowania i wyznaczania prawdopodobieństwa osiągnięcia celu w kalkulacji strategicznej dla infrastruktury krytycznej. Ugruntowaniem poszukiwania właściwej dla danej problematyki celu strategicznego struktury jest testowanie sieci. Testowanie oraz weryfikacja matematycznego modelu sieci dla tej metody sprowadza się do porównania zbioru unormowanych danych wejściowych i wyjściowych, które brały udział w uczeniu się sieci z danymi, które w ogóle nie brały udziału w nauczaniu. W przypadku gdy wynik testowania jest powyżej 90%, można uznać, iż model matematyczny współczynników składających się na całkowite prawdopodobieństwo oparty na wielowarstwowej sztucznej sieci neuronowej poprawnie odwzorowuje rzeczywistą wartość prawdopodobieństwa osiągnięcia celu kalkulacji strategicznej.

Słowa kluczowe: kalkulowanie, testowanie i weryfikacja modelu sieci

1. WPROWADZENIE

Szczęście i wolność – wydawałoby się, że to dwa słowa, które dają człowiekowi poczucie bezpieczeństwa, swobody, wolności słowa, obyczaju i innych niezbędnych do egzystencji czynników, bez których współczesny człowiek nie wyobraża sobie normalnego życia. Normalne życie to scenariusze, które pisały się od początków ludzkości wraz z pojawieniem się człowieka na Ziemi. Każdy dzień przynosił nowe wyzwania, by przetrwać, począwszy od oddychania, a kończąc na nadrzędnym czynniku, jakim było zdobywanie żywności. Wówczas człowiek nie definiował

* Rektor-Komendant Lotniczej Akademii Wojskowej.
** Dowódca Akademickiego Centrum Szkolenia Lotniczego Lotniczej Akademii Wojskowej.

szczęścia, wolności, poczucia bezpieczeństwa; po prostu na początku to miał i nie przypuszczał, że pojawi się ktoś, kto będzie próbował mu to odebrać. Nie wiedział, że ciągle będzie musiał polować, uprawiać ziemię, by przetrwać, by zdobyć żywność. Zaczął więc kalkulować, liczyć, na jak długo po polowaniu czy zebraniu plonów tej żywności mu wystarczy. Z biegiem czasu doszły kolejne wyzwania, jak ochrona i obrona tego, co już osiągnął i zdobył. Nie dopuszczał myśli do siebie, że może to stracić, nie wiedział co znaczy porażka i zawsze smakował zwycięstwa. Coraz częściej smak ten stawał się trudniejszy do osiągnięcia. Kalkulacja, jak osiągnąć zamierzony cel, stała się powszedniością. Sama klasyczna kalkulacja również starzała się, potrzebowała rozwoju, wynalazczości, innowacyjności, by móc w dalszym ciągu pomagać człowiekowi w osiągnięciu jego celów aż do dziś. Obecnie kalkulacja zdaniem autorów związana jest z szeroko rozumianą matematyką. Składa się na nią liczenie, potęgowanie, planowanie, szacowanie ryzyka, dopuszczenie nawet porażki, by później jednak osiągnąć zamierzone cele, zbieranie informacji, analizowanie historii, przyczyn konfliktów zbrojnych, krachów na giełdzie i gospodarczych, wyciąganie wniosków w liczbach, by porównać z obecnym i prognozowanym PKB (produkt krajowy brutto), aż wreszcie najbardziej zaawansowana kalkulacja, jaką jest użycie sztucznych sieci neuronowych, w skrócie sztucznej inteligencji, jako narzędzia do kalkulowania i prognozowania oraz wspomagania procesu decyzyjności.

2. KALKULOWANIE KLASYCZNE – AKTUALNY STAN NA ŚWIECIE

„Kalkulacja [łac. *calculatio* ‘obliczenie’], obliczanie kosztów przypadających na tzw. jednostkę kalkulacyjną. Kalkulacja to także czynności obliczeniowe, prowadzące do określenia kosztów jednostkowych, ceny lub rentowności jednostkowej. Ustalenie za pomocą kalkulacji w jednostkach pieniężnych i naturalnych wielkości zużycia środków gospodarczych dla wykonania określonych zadań jest pomocne przy wyborze efektywnych działań gospodarczych i określaniu cen” [Encyklopedia PWN 2022]. Ta klasyczna definicja odnosi się do gospodarki każdego współczesnego kraju, ale z punktu widzenia kalkulowania militarnego i niemilitarnego oraz zapewnienia wspomnianych wcześniej szczęścia i wolności jest niezwykle istotna, by osiągnąć zwycięstwo. Biorąc pod uwagę wymiar, jakim jest czas, procesowi planowania towarzyszy nieodzownie proces kalkulowania, który można podzielić na kalkulowanie krótkoterminowe, średnioterminowe i długoterminowe, a całość nazwać po prostu kalkulowaniem strategicznym w funkcji czasu. Kalkulowanie krótkoterminowe to przedział od 2 do 3 lat. Kalkulowanie średnioterminowe to przedział od 3 do 6 lat, natomiast kalkulowanie długoterminowe to przedział powyżej 6 lat. Każdy proces kalkulowania na linii czasu to identyfikacja inicjatywy, która powinna prowadzić do wdrożenia opracowanej strategii. Proces ten uwzględnia następujące elementy:

- Dokonywanie analiz strategicznych polegających na kalkulacji korzyści, definicji kosztów i ryzyka, by sprecyzować i zwymiarować założone cele strategiczne.
- Aranżacja i tworzenie planów wdrożenia strategii, podejmowanie decyzji w sposób optymalny, wskazując przy tym interesariuszy i osoby odpowiedzialne za działania operacyjne opisane i zdefiniowane w strategii.
- Motywacja osób do działania w ramach opracowanej strategii.
- Wskazanie najbardziej optymalnej kalkulacji, która ma największy wpływ na osiąganie zamierzonych, niejednokrotnie złożonych problematycznie celów strategicznych.
- Powyższe zagadnienia związane z kalkulacją strategiczną składają się na kalkulowanie klasyczne, gdzie w ocenie autorów nie wskazano jeszcze zagrożeń zewnętrznych i wewnętrznych, jakie mogą powstać podczas planowania i kalkulacji strategicznej.

3. KALKULOWANIE STRATEGICZNE ZŁOŻONE NA PODSTAWIE JAKOŚCIOWEJ MATRYCY SWOT ORAZ SZTUCZNEJ SIECI NEURONOWEJ

Jakościowa matryca SWOT (jakościowa matryca wykorzystywana do analizy i porównania mocnych, słabych stron, szans i zagrożeń systemów etc) została wykorzystana do analizy i porównania mocnych, słabych stron, szans i zagrożeń dla osiągnięcia celów strategii poprzez kalkulację czynników wchodzących w skład rozpatrywanej kalkulacji. Gruntowna analiza SWOT polega na podzieleniu zebranych informacji na cztery grupy (cztery kategorie czynników będących składowymi kalkulacji dla osiągnięcia założonych celów w strategii).

- **S** (*Strengths*) – mocne strony – wszystko to, co stanowi atut, przewagę, zaletę,
- **W** (*Weaknesses*) – słabe strony – wszystko to, co stanowi słabość, barierę, wadę,
- **O**(*Opportunities*) – szanse – wszystko to, co stwarza szansę korzystnej zmiany,
- **T** (*Threats*) – zagrożenia – wszystko to, co stwarza niebezpieczeństwo zmiany niekorzystnej.

Poniżej przedstawiono przykładową analizę SWOT dla kalkulowania i planowania strategicznego w funkcji czasu.

Grupa 1 S (*Strengths*) – mocne i silne strony w kalkulacji strategicznej.

1. Gruntowna znajomość metodologii kalkulowania w deficycie czasu.
2. Jasno określone cele w etapach planowania.
3. Właściwe skalkulowanie ryzyka podjęcia działań.
4. Właściwie zwymiarowane założone cele w kalkulowaniu strategicznym.

5. Optymalizacja działań w funkcji posiadanego czasu do planowania, by osiągnąć założony cel.

Grupa 2 W (*Weaknesses*) – słabe strony w kalkulacji strategicznej.

1. Potencjalny błąd w ocenie korzyści z osiągnięcia celów spowodowany deficytem czasu na planowanie.
2. Niedostateczne oszacowanie możliwych wydarzeń mogących mieć wpływ na zachowanie rynków i giełdy.
3. Nieprzewidziane zachowania walut, możliwe konflikty o charakterze zbrojnym mające wpływ na gospodarkę danego państwa.

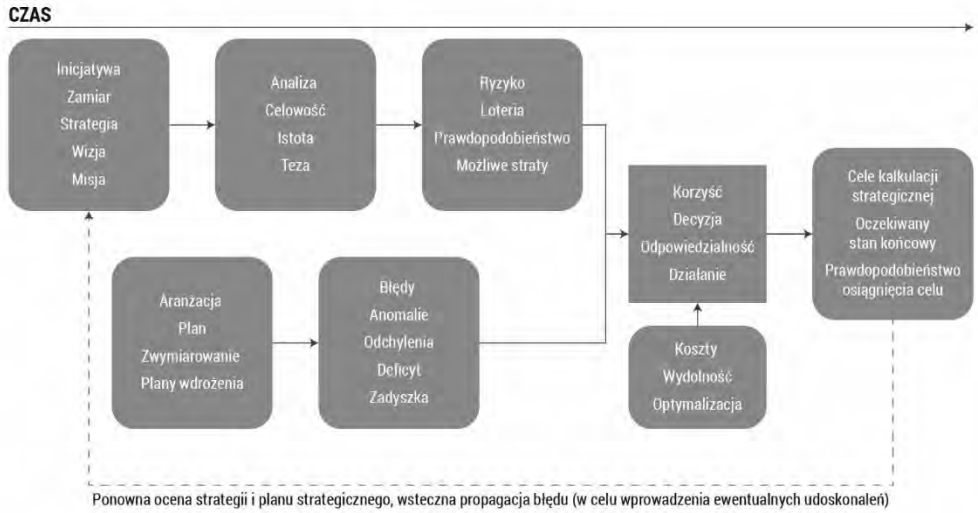
Grupa 3 O (*Opportunities*) – szanse osiągnięcia zakładanego celu w kalkulacji strategicznej.

1. Zdefiniowanie cech charakteru przeciwnika i użycie ich przeciw niemu.
2. Nieprzewidywalność, zmiana metod osiągania założonych celów w strategii.
3. Ciągła motywacja osób pracujących na osiągnięcie zakładanego celu strategii bez względu na okoliczności, utrzymanie wysokiego morale.
4. Destabilizacja i zaskoczenie przeciwnika.
5. Zdobycie małej przewagi to małe zwycięstwo, które należy wykorzystać do obrony osiągnięć lub do ostatecznego dobicia przeciwnika.

Grupa 4 T (*Threats*) – zagrożenia w kalkulacji strategicznej.

1. Nieprawidłowe dane, słaba znajomość rozpatrywanej problematyki.
2. Niewystarczająca znajomość założeń i tez do osiągnięcia celu.
3. Niewystarczająca motywacja do wytężonej pracy, morale zespołu.
4. Błędna ocena wydolności państwa w aspekcie osiągnięcia celów strategicznych.
5. Niewłaściwe szacowanie ryzyka w planowaniu.

Inspirację do podjęcia problematyki procesu kalkulacji strategicznej stanowiło szerokie spektrum zastosowania sztucznej sieci neuronowej [Lula i Tadeusiewicz 2001] w obecnym świecie techniki i nie tylko metod wspomagania decyzji. Na podstawie analizy dotychczasowych osiągnięć związanych z zastosowaniem sztucznej sieci neuronowej w różnych dziedzinach życia codziennego istnieje możliwość użycia jej w roli narzędzia wspomagającego proces kalkulowania strategicznego. W celu przeprowadzenia analizy do opracowania modelu sieci neuronowej oraz zbioru parametrów misji kalkulowania strategicznego wykorzystano inferencję jakościową SWOT, która pozwala na wgląd w zalety, braki, szanse i zagrożenia prowadzenia procesu kalkulacji strategicznej. Na podstawie dostępnej literatury zastosowanie inferencji jakościowej SWOT doprowadziło do opracowania modelu przepływu informacji i danych w procesie kalkulacji strategicznej (Rys. 1).



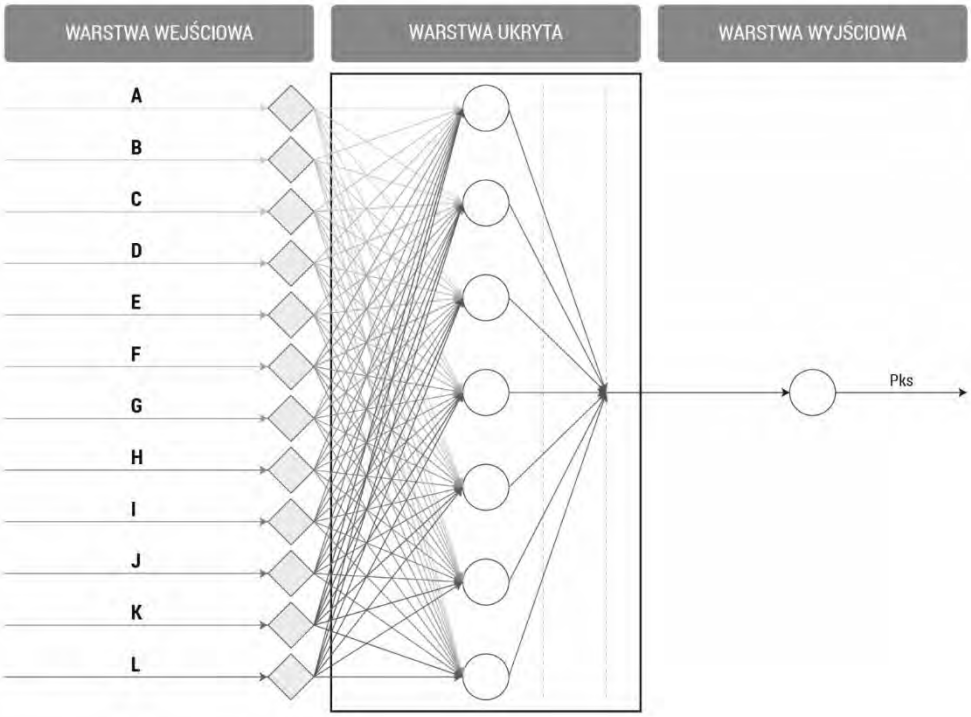
Rys. 1. Model przepływu informacji oraz danych na podstawie matrycy SWOT podczas kalkulacji strategicznej w funkcji czasu [opracowanie własne].

W oparciu o model przepływu danych i zawartości informacji zdefiniowano model matematyczny [Manerowski 2001] sztucznej sieci neuronowej, którego istotą jest wyznaczenie optymalnego celu strategicznego dla unormowanych wielkości wejściowych i wyjściowych, czynników stanowiących materiał do uczenia się sztucznej sieci neuronowej. Zbiór unormowanych wielkości wejściowych i wyjściowych do modelu sieci wyznaczania optymalnego celu strategicznego przedstawia się następująco:

1. Wielkość wejściowa (A) – zasoby.
2. Wielkość wejściowa (B) – potencjał.
3. Wielkość wejściowa (C) – oszacowane ryzyko.
4. Wielkość wejściowa (D) – zagrożenia gospodarcze.
5. Wielkość wejściowa (E) – koszty.
6. Wielkość wejściowa (F) – czas.
7. Wielkość wejściowa (G) – zespół i jego morale.
8. Wielkość wejściowa (H) – środowisko jako podmiot i otoczenie.
9. Wielkość wejściowa (I) – wiedza, znajomość problematyki kalkulowania.
10. Wielkość wejściowa (J) – budżet i jego granice.
11. Wielkość wejściowa (K) – zużycie zasobów.
12. Wielkość wejściowa (L) – rezerwy.
13. Wielkość wyjściowa (Pks) – prawdopodobieństwo osiągnięcia celu strategicznego na podstawie procesu kalkulacji strategicznej.

Wyżej wymieniony model matematyczny [Manerowski 2001] sieci przedstawia rysunek 2, którego istotą jest wyznaczenie prawdopodobieństwa sukcesu osiągnięcia celu strategicznego na podstawie kalkulacji dla wielkości wejściowych

i wyjściowych. Do praktycznego obliczenia prawdopodobieństwa osiągnięcia celu strategicznego optymalnego można zastosować oprogramowanie komputerowe sztucznej sieci neuronowej Airnet 1.0 [Lonnblad, Peterson i Rognvaldsson 1992], które umożliwia zbudowanie modelu sieci będącego odzwierciedleniem modelu przepływu informacji oraz danych w procesie kalkulacji strategicznej. Innymi słowy, chodzi tutaj o transformację inferencji jakościowej SWOT na model SSN (sztuczna sieć neuronowa). Oprogramowanie komputerowe Airnet 1.0 wykorzystuje algorytm metody opartej na wstecznej propagacji błędu dla sieci jednokierunkowej preceptorowej dla poszukiwania wartości stałych i wag pomiędzy warstwami sieci, które zostały wyznaczone na podstawie wyników doświadczeń (przykładów uczących) drogą kolejnych poprawek (korekt), tak aby wyjście (odpowiedzi sieci) zbliżało się do wartości rzeczywistych i sprowadzało się do poszukiwań struktury sieci. Oznacza to, że jest to metoda uczenia sieci wielowarstwowej, w której błąd ostatniej warstwy jest przesyłany wstecz i wykorzystywany do zmiany przez system wartości parametru wartości sygnałów wejściowych (tzw. wag połączeń) w poprzednich warstwach. Parametr ten jest zmieniany poziom po poziomie wstecz, dzięki czemu system się uczy.



Rys. 2. Przykładowy model matematyczny SSN wyznaczania prawdopodobieństwa osiągnięcia celu kalkulacji strategicznej [opracowanie własne na podstawie: Lönnblad, Peterson i Rögnvalsson 1992, Lula i Tadeusiewicz 2001, Wróblewski 2016].

Tabela 1

Dziesięć przykładowych zestawów danych opracowanego zbioru unormowanych wielkości wejściowych i wyjściowych dla modelu sieci neuronowej wyznaczania prawdopodobieństwa osiągnięcia celu kalkulacji strategicznej przed procesem normalizacji [Wróblewski 2016].

Lp.	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	Pks
1	0,5	2,4	0,9	0,25	10,8	43,2	0,69	0,68	0,07	1	1	60	0,47
2	2	3	2,8	4	54,67	13,66	0,57	0,63	0,20	2	3	90	0,36
3	2	3,3	4,3	4	151,4	37,86	0,75	0,93	0,38	3	5	120	0,7
4	5	3	8,5	25	453,6	18,14	0,6	0,9	1,68	4	10	90	0,54
5	10	2,4	12,5	100	639,3	6,39	0,78	0,92	2,22	5	20	120	0,72
6	5	3	6,75	25	216	8,64	0,27	0,68	1,2	6	30	60	0,19
7	15	3	11,25	225	388,8	1,728	0,60	0,88	2,16	7	10	60	0,53
8	5	2,4	8,5	25	449,2	17,97	0,95	0,97	1,56	8	20	120	0,93
9	4	3	6,8	16	286,2	17,88	0,75	0,69	1,59	9	3	60	0,54
10	5	2,4	6,75	25	207,3	8,29	0,83	0,78	0,96	10	10	90	0,19

W celu przygotowania danych liczbowych do sieci neuronowej poddano je normalizacji, wykorzystując aplikację „NORMALIZ", która miała za zadanie wyznaczenie danych do sieci. Normalizacja danych to skalowanie pierwotnych danych np. (danych wejściowych i wyjściowych) do małego, specyficznego przedziału, przykładowo do przedziału [–1,1] lub [0,1], czyli przedziałów najbardziej przydatnych podczas rozważania zagadnień związanych z sieciami neuronowymi. W wyniku normalizacji danych otrzymujemy wektory, których wartości cech są zawarte w przedziale [0,1]. Skalowanie przeprowadzono, wykorzystując zasady liniowej transformacji min-max według poniższego wzoru.

$$\bar{X} = \frac{X - X\,min}{\Delta X} \tag{1}$$

gdzie:
$\bar{X}$ – wartość unormowana,
X – wartość do unormowania ze zbioru wartości,
$X\,min$ – najmniejsza wartość ze zbioru wartości,
ΔX – różnica największej i najmniejszej wartości ze zbioru wartości.

Tak przygotowane wielkości stanowią unormowaną bazę danych wejściowych i wyjściowych modelu matematycznego sztucznej sieci neuronowej wyznaczania prawdopodobieństwa sukcesu poszukiwań POS. Poniżej zamieszczono część wielkości wejściowych i wyjściowych algorytmu wyznaczania prawdopodobieństwa sukcesu poszukiwań POS do sztucznej sieci neuronowej po procesie normalizacji (tab. 2).

Tabela 2

Dziesięć przykładowych zestawów danych opracowanego zbioru unormowanych wielkości wejściowych i wyjściowych dla modelu sieci neuronowej wyznaczania prawdopodobieństwa osiągnięcia celu kalkulacji strategicznej po procesie normalizacji [Wróblewski 2016].

Lp.	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	Pks
1	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,460	0,607	0,157	0,010	0,01	0,010	0,010	0,262
2	0,113	0,676	0,082	0,026	0,016	0,145	0,281	0,841	0,015	0,67	0,078	0,510	0,631
3	0,113	0,990	0,140	0,026	0,032	0,403	0,389	0,862	0,023	0,99	0,147	0,990	0,883
4	0,320	0,676	0,301	0,120	0,079	0,193	0,353	0,957	0,082	0,67	0,320	0,510	0,894
5	0,665	0,010	0,454	0,453	0,108	0,067	0,295	0,788	0,106	0,01	0,665	0,990	0,620
6	0,320	0,676	0,234	0,120	0,042	0,091	0,308	0,873	0,060	0,67	0,990	0,010	0,715
7	0,990	0,676	0,406	0,990	0,069	0,017	0,041	0,631	0,104	0,67	0,320	0,010	0,083
8	0,320	0,010	0,301	0,120	0,078	0,191	0,345	0,967	0,077	0,01	0,665	0,990	0,883
9	0,251	0,676	0,236	0,080	0,053	0,190	0,465	0,512	0,078	0,67	0,492	0,010	0,894
10	0,320	0,010	0,234	0,120	0,040	0,087	0,543	0,681	0,049	0,01	0,147	0,510	0,083

4. PODSUMOWANIE

Zastosowanie SSN jako metody wspomagania w kalkulowaniu może wykazać, że jest ona skutecznym narzędziem do prognozowania i wyznaczania prawdopodobieństwa osiągnięcia celu w kalkulacji strategicznej. Samo uczenie sieci i wyznaczenie struktury, gdzie zdarzenia pozytywne zawierają się w przedziale od 90 do 100%, to jeszcze nie wszystko. Ugruntowaniem poszukiwania właściwej dla danej problematyki celu strategicznego struktury jest testowanie sieci. Testowanie oraz weryfikacja matematycznego modelu sieci dla tej metody sprowadza się do porównania zbioru unormowanych danych wejściowych i wyjściowych, które brały udział w uczeniu się sieci z danymi, które w ogóle nie brały udziału w nauczaniu. W przypadku gdy wynik testowania jest powyżej 90%, można uznać, iż model matematyczny współczynników składających się na całkowite prawdopodobieństwo oparty na wielowarstwowej sztucznej sieci neuronowej poprawnie odwzorowuje rzeczywistą wartość prawdopodobieństwa osiągnięcia celu kalkulacji strategicznej.

LITERATURA

1. Encyklopedia PWN, https://encyklopedia.pwn.pl (dostęp 10.05.2022).
2. Lönnblad L., Peterson C., Rögnvalsson T., 1992, Pattern recognition in high energy physics with artificial neural networks - JETNET 2.0, Computer Physics Communications, nr 70, s. 167-182.
3. Lula P., Tadeusiewicz R., 2001, Wprowadzenie do sieci neuronowych, Kraków.
4. Manerowski J., 2001, Modelowanie dynamiki lotu samolotu z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych, Prace Naukowe ITWL, z. 13, s. 73-83.
5. Tzu S., Sztuka wojny, Gliwice 2013.
6. Wróblewski W., 2016, Metoda wspomagania decyzji w śmigłowcowych akcjach poszukiwawczo-ratowniczych. Praca doktorska, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa.

DECISION SUPPORT METHODS IN THE STRATEGIC CALCULATION FOR THE CRITICAL INFRASTRUCTURE

Abstract

The use of an artificial neural network as a method of supporting the calculation may prove that it is an effective tool for forecasting and determining the probability of achieving the goal in the strategic calculation for the critical infrastructure. Network testing is the foundation for the search for the appropriate strategic goal for a given issue. Testing and verification of the mathematical model of the network for this method comes down to comparing the set of standardized input and output data that was involved in learning the network with data that was not involved in learning at all. If the test result is above 90%, it can be concluded that the mathematical model of the coefficients constituting the total probability based on a multilayer artificial neural network correctly reflects the actual probability value of achieving the goal of strategic calculation.

Keywords: calculation, testing and verification of the network model

Paweł CZYŻEWSKI*
Rafał ŚLEFARSKI*

GAZY SYNTETYCZNE JAKO ŹRÓDŁO WODORU DLA SYSTEMÓW GENERACJI ENERGII

Zastępowanie produktów ropopochodnych, węgla oraz gazu ziemnego poprzez nośniki odnawialne jest istotnym wyzwaniem w kontekście użytkowania układów zasilania w energię elektryczną i cieplną infrastruktury krytycznej. Będą one opierać się o wykorzystanie baterii magazynujących energię jak również układach wykorzystujących wodór i inne gazy jako źródło energii dla ogniw paliwowych. W publikacji przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych, mających na celu wyznaczenie charakterystyk temperaturowych rozkładu metanu obecnego w gazach syntetycznych do wodoru i tlenku węgla na powierzchni katalizatora opartego o platynę. W najkorzystniejszej konfiguracji uzysk wodoru wyniósł ponad 30% jego stanu początkowego w surowym gazie syntetycznym przy 12% udziale metanu. Najbardziej korzystny przebieg carakterystyki zanotowano dla uzysku tlenku węgla. W każdym rozważanym przypadku, wyniósł on co najmniej 25%, osiągając nawet 180%. Kraking katalityczny jest potencjalną metodą kondycjonowania gazów syntetycznych na potrzeby nowoczesnych układów zasilania w obiektach infrastruktury krytycznej.

Słowa kluczowe: gazy syntetyczne, wodór, kraking katalityczny

1. WPROWADZENIE

Pandemia koronawirusa wraz ze skomplikowaną sytuacją geopolityczną wywołaną napaścią Rosji na Ukraine znacząco odmieniły rynek energetyczny Unii Europejskiej, w tym Polski. Oprócz znaczącej zwyżki cen podstawowych nośników energetycznych takich jak gaz ziemny(*Natural gas price*, 2022), ropa naftowa i węgiel(*Coal price*, 2022) zmniejszyła się również ich dostępność, zwłaszcza w wyniku wprowadzeina emgarga na paliwa z Rosji i konieczności stworzenia nowych szlaków handlowych. Przyczyniło się to do zmniejszenia bezpieczeństwa pewności dostaw nośników energetycznych, a w konsekwencji energii elektrycznej. Obecnie podejmuje się wiele dzia-

* Politechnika Poznańska, Instytut Energetyki Cieplnej.

łań, zarówno na szczeblu krajowym jak i unijnym, które mają na celu pozyskanie alternatywnych dostawców. Równolegle z racji wysokich cen paliw kopalnych, poprawiła się opłacalność pozyskiwania nośników alternatywnych, obejmujących frakcje odnawialne biomasy jak również wykorzystanie dostępnych lokalnie odpadów komunalnych. Ponadto zaistniała możliwość efektywnego ekonomicznie wdrożenia technologii, pozwalających na produkcję strumieni paliw syntetycznych(da Silva Pinto *et al.*, 2022), opartych o wykorzystanie gazów syntetycznych różnorodnego pochodzenia. Technologie te opierają się o szereg procesów termo-chemicznych i fizyko-chemicznych, wykorzystywanych przemysłowo już od dziesiątek lat(Akhtar, Krepl and Ivanova, 2018). Przy wysokich cenach ropy naftowej, dzięki ich implementacji na potrzeby produkcji wodoru i gazów syntetycznych pochodzących ze źródeł odnawialnych, stają się one alternatywą dla jej pochodnych. Obecnie, w wielu rafineriach europejskich, planowane są inwestycje w tym obszarze. Niewątpliwie, planowane przez UE osiągnięcie celu zaprzestania produkcji samochodów osobowych z silnikiem spalinowym do 2035 zdynamizuje proces modernizacji rafinerii w kierunku produktów alternatywnych w tym paliw syntetycznych. Jak wspomniano, podstawą do produkcji paliw syntetycznych są wodór oraz tlenek węgla; typowe składniki gazów syntetycznych.

W procesach zgazowania i pirolizy, w zależności od zastosowanego substratu jak i warunków w reaktorze uzyskuje się gaz produktowy o bardzo zróżnicowanym składzie(Ślefarski *et al.*, 2021). W typowych zastosowaniach zazwyczaj produktem docelowym jest gaz charakteryzujący się jak najwyższym udziałem wodoru, stosukiem udziałów objętościowych wodoru do tlenku węgla (H2/CO)(Sun *et al.*, 2010) lub jak najwyższą wartością opałową. Na chwilę obecną, wobec wzrastającego zapotrzebowania przemysłu na zielony wodór(Corengia, Estefan and Torres, 2020), preferowane będą gazy o wysokim udziale wodoru.

Zagadnienie redukcji węglowodorów obecnych w pierwotnych gazach syntetycznych pochodzących z pirolizy lub zgazowania do tlenku węgla oraz wodoru jest kluczowe z punktu widzenia efektywności ich dalszego przetwarzania. Jest to czynnik determinujący ekonomiczne uzasadnienie zastosowania tego typu gazów (uznawanych za źródło odnawialne) do dalszych syntez chemicznych czy zasilania ogniw paliwowych w układach zasilania w energię elektryczną i ciepło. Najmniej skomplikowaną metodą jest kraking termiczny(Cozzani *et al.*, 1995). Polega on na podgrzewaniu przepływającego strumienia gazów do bardzo wysokiej temperatury (od ok. 1000°C w górę). Następuje wtedy dekompozycja węglowodorów zawartych w gazie do tlenku węgla oraz wodoru. Rozgrzewanie reaktorów do tak wysokiej temperatury jest jednak bardzo energochłonne, dlatego czyni się wszelkie wysiłki aby obniżyć temperaturę tego procesu. Jedną z możliwych metod, rozpowszechnioną na skalę przemysłową jest reforming parowy(Ping *et al.*, 2019). Jest to metoda efektywna tylko na dużą skalę (zakłady przemysłowe takie jak rafinerie, czy produkcja nawozów sztucznych). Dla mniejszych instalacji, np. kompaktowych układów zasilania jednostek wojskowych czy elementów infrastruktury krytycznej konieczne jest opracowanie technologii za-

pewniającej kompaktowość, niezawodność oraz prostotę prowadzenia procesu. Pomimo wysokiej ceny platyny, ze względu na skuteczność działania oraz prostotę użytkowania gotowych instalacji jest ona podstawowym komponentem wielu przemysłowych reaktorów katalitycznych. Dlatego konieczny jest dalszy rozwój narzędzi wspomagających projektowanie układów katalizy przy pomocy platyny tak, aby zoptymalizować proces w kierunku jak najmniejszego zużycia tego materiału przy zachowaniu pożądanych właściwości gazu opuszczającego reaktor.

W publikacji przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych, mających na celu wyznaczenie charakterystyk temperaturowych rozkładu metanu do preferowanych wodoru i tlenku węgla na powierzchni katalizatora opartego o platynę. W ramach obliczeń wstępnych wyznaczono podstawowe parametry złoża katalizatora, jego parametry fizykochemiczne oraz określono parametry prowadzenia procesu katalizy. Po określeniu składu gazów syntetycznych podlegających procesowi katalizy, przeprowadzono właściwy proces obliczeniowy obejmujący wyznaczenie parametrów termodynamicznych mieszanin gazowych oraz symulację katalizy metanu wchodzącego w skład mieszanin gazowych na powierzchni katalizatora platynowego.

2. METODOLOGIA BADAWCZA

Prace badawcze objęły dwa etapy. Wstępny etap przygotowawczy objął następujące czynności:

- wyznaczenie parametrów fizykochemicznych katalizatora,
- określenie geometrii złoża katalizatora,
- określenie temperatury pracy katalizatora,
- określenie składu gazów syntezowych pochodzących z różnych technologii zgazowania biomasy.

Następnie przeprowadzono właściwy proces obliczeniowy. W jego skład weszły:

- wyznaczenie parametrów termodynamicznych wyznaczonych mieszanin gazowych przy pomocy oprogramowania GERG,
- symulacja katalizy (redukcji) metanu na powierzchni katalizatora platynowego przy pomocy oprogramowania Cantera bazującego na środowisku programistycznym Python.

2.1. Skład paliwa

Jako paliwo wejściowe wybrano trzy różnego rodzaju mieszaniny gazów syntetycznych odpowiadające różnym rodzajom technologii zgazowania oraz materiału wsadowego. Dla uproszczenia dalszych rozważań zostały one oznaczone następującymi po sobie symbolami G1, G2 oraz G3. Reprezentują one trzy różne wartości opałowe (niska, średnia oraz wysoka wartość opałowa w grupie gazów syntetycznych po-

chodzących ze zgazowania biomasy)(Szewczyk, Ślefarski and Jankowski, 2017). Tabela 1 przedstawia ich skład (udział objętościowy). Dalsze rozważania będą również odnosiły się do objętościowych udziałów poszczególnych składników.

Tabela 1

Skład paliwa gazowego

Nazwa	**Składnik**				
	Tlenek węgla	Metan	Wodór	Dwutlenek węgla	Azot
	CO	CH_4	H_2	CO_2	N_2
Gaz 1	7,6	11	11,7	55,2	14,5
Gaz 2	7,7	3,3	11,9	56,1	21,1
Gaz 3	7	27	52	5	8,5

2.2. Określenie parametrów geometrycznych, przepływowych oraz fizykochemicznych reaktora katalizy

Na potrzeby obliczeniowe, wybrano reaktor z przepływem tłokowym. Większość przemysłowych reaktorów ma kształt cylindryczny, dlatego tego typu reaktory stanowią pożądany wstęp do projektowania większych instalacji. Dla łatwiejszego odwzorowania i porównania otrzymanych numerycznie wyników na rzeczywistym stanowisku laboratoryjnym, założono możliwie małe wymiary reaktora:

- Powierzchnia podstawy: 1cm2,
- Wysokość: 3cm,
- Prędkość przepływu gazu: 40cm/min,
- Powierzchnia katalizatora: 1000cm/cm3,
- Porowatość: 0,3.

Jako materiał katalizujący reakcję wybrano platynę.

Bazując na doświadczeniach z prac nad redukcją metanu zawartego w gazie syntezowym pochodzącym z biomasy, założono zakres temperatury reakcji pomiędzy 600-1200°C i atmosferę pozbawioną utleniacza (współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda=0$).

2.3. Model numeryczny

Do analiz numerycznych zastosowano program Cantera działający na platformie programistycznej Python. Cechuje się on dużą dokładności modeli i mechanizmów zawierających się w zakresie narzędzia obliczeniowego. Program posłużył do do sporządzenia obliczeń numerycznych redukcji metanu na powierzchni platyny. Poniżej przedstawiono charakterystykę dobranego modelu:

Nazwa modelu: 'methane_pox_on_pt.cti'

Wybrany model rozwiązuje zagadnienie reaktora cylindrycznego z przepływem tłokowym poprzez realizacje zbioru następujących po sobie reakcji w zero-wymiarowych reaktorach. Wynik każdej kolejnej symulacji jest przekazywany na wejście kolejnego takiego samego reaktora. Pomija się w nim dyfuzję gazów, oraz zjawisko przeciwprądowe. W reaktorach katalizy najczęściej nie wykorzystuje się zjawiska recyrkulacji gazów, przez co ich dyfuzja oraz zjawisko przeciwprądowe są znacząco ograniczone.

3. WYNIKI

3.1. Właściwości paliwa warunkujące ich spalanie

Stabilne spalanie gazów o niskich wartościach opałowych (zwłaszcza paliw G1 oraz G2) jest technicznie problematyczne i wymaga zaprojektowania specjalnych instalacji. Dlatego przekierowanie części strumienia tych gazów do reaktora katalizy w celu zwiększenia finalnego udziału wodoru, który zwiększa stabilność spalania może być preferowaną formą utylizacji gazów syntetycznych również na potrzeby spalania. Mając to na uwadze, we wstępnym etapie obliczeniowym wyodrębniono podstawowe właściwości wybranych paliw gazowych istotne z punktu widzenia ich dalszego spalania. Wyniki obliczeń przedstawiono w Tabeli 2.

Tabela 2

Parametry badanych paliw w kontekście ich spalania

Nazwa gazu	Zapotrzebowanie na tlen (stechiometryczne)	Wartość opałowa	Zapotrzebowanie na powietrze (stechiometryczne)	Adiabatyczna temperatura spalania	Laminarna prędkość spalania S_L
	Nm^3O_2/Nm^3pal	MJ/Nm^3	$Nm^3pow./Nm^3pal.$	[K]	[cm/s]
Gaz 1	0,3171	6,17	1,51	1906	46,6
Gaz 2	0,168	3,42	0,8	1609	27,5
Gaz 3	0,835	16,17	3,14	2226	70,1

3.2. Właściwości termodynamiczne badanych syngazów

Proces katalizy metanu jest prowadzony w bardzo wysokiej temperaturze, przekraczającej zwykle 600˚C, osiągając wartości powyżej 1000˚C. W takich warunkach

zmieniają się właściwości termodynamiczne różnych gazów jak i ich mieszanin, którymi są gazy syntetyczne. W poniższych tabelach są zaprezentowane charakterystyki ich zmienności w zależności od temperatury poczynając od temperatury 0˚C, 1013hPa (warunki normalne), a kończąc na 1000˚C w warunkach tego samego ciśnienia. Obejmują one zależności gęstości, ciepła właściwego, współczynnika Jouel'a Thomsona oraz współczynnika ściśliwości Z.

Tabela 3

Wartości gęstości oraz ciepła właściwego badanych syngazów

Temperatura [°C]	Gęstość ρ [kg/m^3]			Ciepło właściwe c_p [kJ/(kgK)]		
	G1	G2	G3	G1	G2	G3
0	1,45	1,50	0,53	1,04	0,99	2,58
100	1,06	1,09	0,39	1,12	1,07	2,72
200	0,83	0,86	0,31	1,20	1,14	2,87
300	0,69	0,71	0,25	1,28	1,19	3,03
400	0,58	0,61	0,21	1,34	1,24	3,18
500	0,51	0,53	0,19	1,40	1,29	3,33
600	0,45	0,47	0,17	1,45	1,33	3,47
700	0,41	0,42	0,15	1,49	1,36	3,60
800	0,37	0,38	0,14	1,53	1,39	3,72
900	0,34	0,35	0,12	1,56	1,42	3,83
1000	0,31	0,32	0,11	1,59	1,44	3,93

Tabela 4

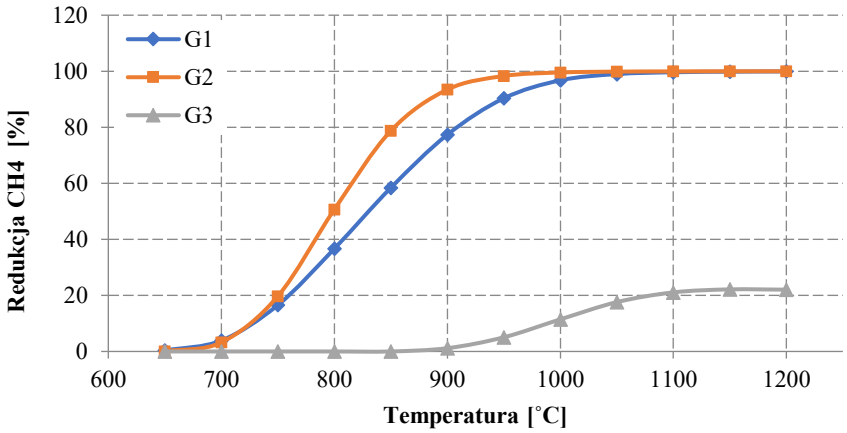
Wartości współczynnika ściśliwości oraz współczynnika Joule'a Thomsona badanych syngazów

Temperatura [°C]	Współczynnik ściśliwości Z [-]			Współczynnik Joule'a-Thomsona μ [K/MPa]		
	G1	G2	G3	G1	G2	G3
0	0,997	0,997	0,999	7,15	7,10	1,52
100	0,999	0,999	1,000	3,57	3,54	0,65
200	0,999	0,999	1,000	2,06	2,04	0,22
300	1,000	1,000	1,000	1,25	1,24	-0,03
400	1,000	1,000	1,000	0,77	0,76	-0,17
500	1,000	1,000	1,000	0,45	0,44	-0,27
600	1,000	1,000	1,000	0,24	0,22	-0,33

700	1,000	1,000	1,000	0,08	0,06	-0,37
800	1,000	1,000	1,000	-0,04	-0,06	-0,40
900	1,000	1,000	1,000	-0,13	-0,15	-0,42
1000	1,000	1,000	1,000	-0,20	-0,23	-0,43

3.3. Analiza procesu katalizy na powierzchni katalizatora platynowego

W tym podrozdziale przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych reakcji metanu na powierzchni katalizatora platynowego. Celem procesu jest redukcja metanu do wodoru i tlenku węgla. Należy mieć na uwadze, że aby zapobiec utlenianiu cząsteczek zawierających wbudowany węgiel oraz wodór odpowiednio do dwutlenku węgla i pary wodnej proces ten odbywa się w atmosferze beztlenowej. Podobnie jak dla parametrów termodynamicznych, charakterystyki katalizy wyznaczono w zależności od wzrastającej temperatury. Na Rysunku 1 przedstawiono charakterystykę redukcji ilości metanu w finalnym gazie w stosunku do gazu pierwotnego w zależności od temperatury.



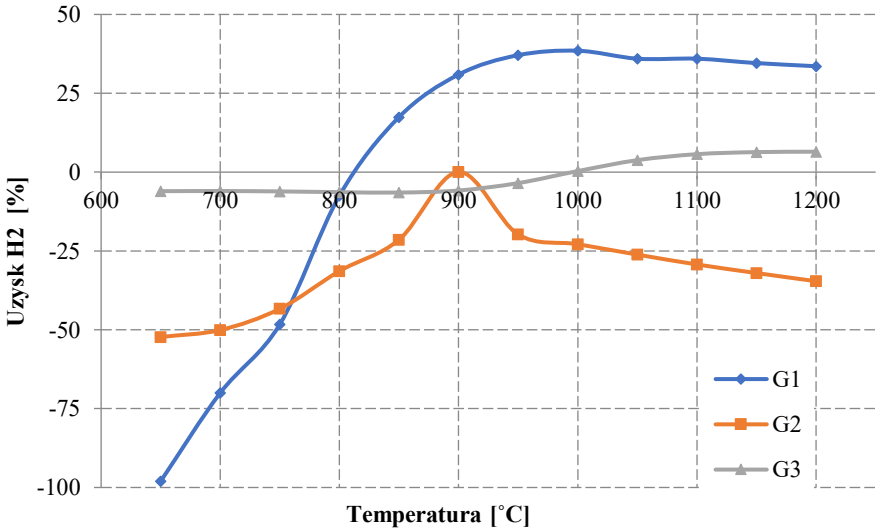
Rys. 1. Charakterystyka redukcji metanu na powierzchni platyny w zależności od temperatury

Intensywność procesu redukcji metanu na powierzchni platyny dla gazu G3 znacznie się różnią w porównaniu do gazu G1 i G2. Metan w paliwach G1 i G2 w temperaturze 650°C nie ulega jeszcze reakcji, natomiast już dla temp. 700°C rozpoczyna się jego dekompozycja (wymagana obecność gazów inertnych np. pary wodnej, tlenu lub dwutlenku węgla w gazie syntezowym dla zapewnienia tlenu do formowania tlenku węgla/pary wodnej). Charakterystyka paliw G1 i G2 jest zbliżona, a rozbieżności wynikają z różnego stosunku azotu do metanu, których stężenia względem siebie termicznie wpływają na dynamikę procesu i możliwość wystąpienia pewnych reakcji. Inaczej

sytuacja ma się w przypadku gazu G3. Reakcja metanu ma miejsce dopiero w temperaturze powyżej 900°C i osiąga wartość jedynie 20% dla 1000°C. Wynika to z braku tlenu mogącego brać udział w reakcji formowania tlenku węgla z nietrwałych rodników powstających z dekompozycji metanu w wysokiej temperaturze. Prawdopodobnie korzystnym działaniem byłoby doprowadzenie do układu dodatkowego tlenu lub powietrza, który mógłby zintensyfikować bądź umożliwić wystąpienie odpowiednich reakcji. Otrzymując tak korzystne rezultaty, postanowiono rozszerzyć interpretację wyników o analizę przyrostu udziału wodoru i tlenku węgla w rozpatrywanym zakresie temperatur.

– Uzysk wodoru

Wykres na Rysunku 2 przedstawia charakterystykę przyrostu/ubytku ilości wodoru po procesie katalizy gazu syntezowego pochodzącego z biomasy.

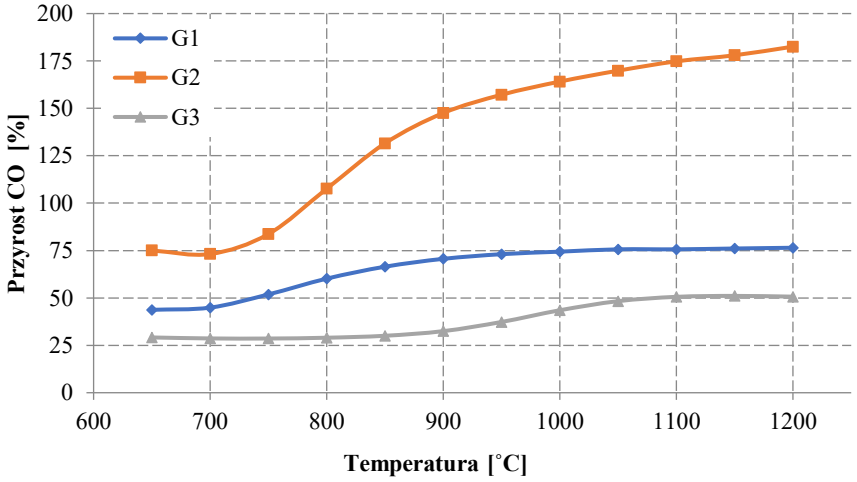


Rys. 2. Charakterystyka redukcji/przyrostu ilości wodoru na powierzchni katalizatora platynowego w zależności od temperatury

Jak widzimy największy przyrost osiągnięto dla gazu G1. Składy gazów G2 i G1 różnią się głównie udziałem objętościowym metanu. Brak przyrostu wodoru dla gazu G2 wynika głównie z braku reagentów potrzebnych do reakcji. Należy zwrócić uwagę na fakt, iż przyrost ilości wodoru dla wszystkich gazów ma miejsce dopiero powyżej temperatury równej 800°C. Przyrost ten jest nieznaczny dla gazu G1, a osiąga najwyższe wartości dla gazów G1 i G3. Korzystna charakterystyka gazu G1 wynika z odpowiedniego stosunku metanu do dwutlenku węgla, zapewniającego odpowiednie stężenia reagentów do powstawania wodoru. Pomimo faktu, iż metan w gazie G2 całkowicie przereagował w temp. 1000°, udział wodoru zaczął spadać. Metan przekonwertował nie w kierunku czystego wodoru, ale pary wodnej. Pomimo bardzo dużego udziału metanu w gazie G3, brak innych potrzebnych do zajścia reakcji reagentów, jak i duży

pierwotny udział wodoru w gazie skutkuje brakiem wystąpienia pożądanego dla procesu zjawiska wzrostu udziału wodoru w finalnym gazie.

Na kolejnym wykresie (Rysunek 3) przedstawiono charakterystykę udziału tlenku węgla w zależności od temperatury dla trzech badanych syngazów.



Rys. 3. Charakterystyka przyrostu tlenku węgla na powierzchni platyny w zależności od temperatury

Dla wszystkich analizowanych gazów we wszystkich punktach obliczeniowych nastąpił przyrost udziału tlenku węgla w stosunku do składu pierwotnego. Już w temperaturze 650°C zauważalny jest wzrost udziału tego komponentu o co najmniej 25%, aż do 75% dla gazu G2. Oznacza to, że duży udział metanu w gazie G1 ogranicza proces formowania się tlenku węgla pomimo takiego samego udziału dwutlenku węgla w gazie na początku procesu. Powyżej temperatury 700°C dla gazów G1 i G2, oraz 1000°C dla gazu G3 następuje dodatkowo reakcja redukcji metanu, który staje się źródłem dodatkowych ilości tlenku węgla. Z powodu braku dużej ilości wolnego tlenu z dwutlenku węgla proces ten ma znacznie mniejszą intensywność niż dla gazów G1 i G2. Tak duży wzrost udziału tlenku węgla w gazie drugim może być spowodowany mniejszą intensywnością formowania się pary wodnej z reformowanego metanu, z powodu braku wolnego wodoru do reakcji. W konsekwencji następuje reakcja formacji tlenku węgla w miejsce pary wodnej.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W trakcie realizacji procesu obliczeniowego udało się uzyskać charakterystyki rozkładu metanu na powierzchni platyny w procesie krakingu katalitycznego platyną.

Proces prowadzony był w wysokiej temperaturze i spodziewano się, iż część zawartego w syngazie metanu zostanie rozłożona do tlenku węgla i wodoru. W przypadku dwóch z trzech badanych paliw cel ten udało się osiągnąć w większym niż założono zakresie. Praktycznie cały metan zawarty w tych paliwach został rozłożony na substraty pozwalające na uformowanie się wodoru i tlenku węgla.
Dla gazu G1 uzysk wodoru wyniósł ponad 30% stanu początkowego. Jest to bardzo korzystny rezultat, mając na uwagę fakt, iż wśród reagujących gazów, udział metanu nie przekroczył 12%, a jest on głównym źródłem wodoru w rozważanej reakcji katalizy. W pewnym zakresie temperatur udział wodoru w gazie obniżył się. Może to być rozważane jako zjawisko pozytywne dla kondycjonowania syngazów zasilających silniki wewnętrznego spalania, gdyż wodór obniża ich odporność na spalanie stukowe.
Najbardziej korzystny przebieg carakterystyki zanotowano dla uzysku tlenku węgla. W każdym rozważanym przypadku, wyniósł on co najmniej 25% już w temperaturze 600°C, osiągając 180% dla gazu G2 w temperaturze 1200°C. Jest to pozytywny rezultat, predysponujący do wykorzystania rozważanej technologii przetwarzania syngazów, do gazów zawierających wysoki udział tlenku węgla mogących zasilać ogniwa paliwowe.
Katalizatory platynowe mogą być z powodzeniem stosowane w małych układach generacji gazów syntetycznych o wysokim udziale wodoru i tlenku węgla. Dalsze prace powinny dotyczyć określenia wpływu zanieczyszczeń gazów syntetycznych na stopień zużycia w czasie katalizatora, a następnie prace eksperymentalne na rzeczywistych reaktorach krakingu katalitycznego.

LITERATURA

Artykuły w czasopismach

1. Akhtar, A., Krepl, V. and Ivanova, T. (2018) ‘A Combined Overview of Combustion, Pyrolysis, and Gasification of Biomass’, *Energy and Fuels*, 32(7), pp. 7294–7318. doi: 10.1021/acs.energyfuels.8b01678.
2. Corengia, M., Estefan, N. and Torres, A. (2020) ‘Analyzing Hydrogen Production Capacities to Seize Renewable Energy Surplus’, *Computer Aided Chemical Engineering*, 48, pp. 1549–1554. doi: 10.1016/B978-0-12-823377-1.50259-7.
3. Cozzani, V. *et al.* (1995) ‘A Fundamental Study on Conventional Pyrolysis of a Refuse-Derived Fuel’, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 34(6), pp. 2006–2020. doi: 10.1021/ie00045a010.
4. Ping, W. *et al.* (2019) ‘A hot syngas purification system integrated with downdraft gasification of municipal solid waste’, *Applied Energy*, 237(November 2018), pp. 227–240. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.031.
5. da Silva Pinto, R. L. *et al.* (2022) ‘An overview on the production of synthetic fuels from biogas’, *Bioresource Technology Reports*, 18, p. 101104. doi: https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101104.
6. Ślefarski, R. *et al.* (2021) ‘Experimental and Numerical-Driven Prediction of

Automotive Shredder Residue Pyrolysis Pathways toward Gaseous Products', *Energies*, 14(6). doi: 10.3390/en14061779.
7. Sun, S. *et al.* (2010) 'Experimental and numerical study of biomass flash pyrolysis in an entrained flow reactor', *Bioresource Technology*, 101(10), pp. 3678–3684. doi: 10.1016/j.biortech.2009.12.092.
8. Szewczyk, D., Ślefarski, R. and Jankowski, R. (2017) 'Analysis of the combustion process of syngas fuels containing high hydrocarbons and nitrogen compounds in Zonal Volumetric Combustion technology', *Energy*, 121, pp. 716–725. doi: 10.1016/j.energy.2017.01.040.

Komunikaty Internetowe

1. *Coal price* (2022). Aktualne ceny węgla w porcie w Rotterdamie https://tradingeconomics.com/commodity/coal. (dostęp 2.05.2022).
2. *Natural gas price* (2022). Aktualne uśrednione ceny gazu ziemnego na giełdach europejskich https://tradingeconomics.com/commodity/natural-gas. (dostęp 2.05.2022).

SYNTHETIC GASES AS A SOURCE OF HYDROGEN FOR POWER SUPPLY SYSTEMS

Abstract

Replacing petroleum products, coal and natural gas with renewable carriers is a significant challenge in the context of the use of emergency power supply systems for critical infrastructure. They will be based on the use of energy storage batteries as well as systems using hydrogen and other gases as a source of energy for fuel cells. The publication presents the results of numerical calculations aimed at determining the temperature characteristics of the decomposition of methane present in synthetic gases to preferred hydrogen and carbon monoxide on the surface of the platinum-based catalyst. In the most preferred configuration, the hydrogen recovery was over 30% of its initial state in the product synthetic gas with a 12% share of methane. The most favorable course of the caracteristics was recorded for the yield of carbon monoxide. In each case under consideration, it was at least 25%, reaching even 180%. Catalytic cracking is a potential method of conditioning synthetic gases for the needs of modern power systems in critical infrastructure facilities.

Keywords: synthetic gases, catalytic cracking, critical infrastructure

Grzegorz DAHLKE*

MODELE FORMALNE POŻARÓW I WYBUCHÓW W PRZYGOTOWANIU INFRASTRUKTURY KRYTYCZNEJ NA SYTUACJE AWARYJNE

W artykule zaprezentowano przykład zastosowania modeli formalnych pożarów, wybuchów i skażeń w procesie tworzenia planów przygotowania na sytuacje awaryjne infrastruktury krytycznej. Wytyczne przygotowywania takich planów są elementem systemów zarządzania bezpieczeństwem zapisanych w normalizacji krajowej i międzynarodowej. Plany takie są odpowiednikiem planów zarządzania kryzysowego, ale dotyczą organizacji, które dążą do efektywnego zarządzania ryzykami zdarzeń powodujących straty.

Słowa kluczowe: sytuacja awaryjna, modelowanie pożarów, modelowanie wybuchów, modelowanie dyspersji

1. WPROWADZENIE

Wytyczne wdrażania systemów zarządzania bezpieczeństwem pracy zawierają zbiór odnoszący się do przygotowania na sytuacje awaryjne (ang. emergency prepardness). Sytuacje takie definiowane są jako „*nieplanowane lub nieprzewidziane sytuacje wymagające natychmiastowej reakcji (np. zapalenie się maszyny w miejscu pracy lub klęska żywiołowa w pobliżu miejsca pracy lub w innym miejscu, w którym pracownicy wykonują działania związane z pracą)*. Obejmują one [PN ISO 45001]:

− *sytuacje, takie jak niepokoje społeczne w miejscu, w którym pracownicy wykonują działania związane z pracą, które wymagają pilnej ewakuacji,*

− *zdarzenia naturalne, techniczne i spowodowane przez człowieka, które mają miejsce w normalnych godzinach pracy i poza tymi godzinami*.

* Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Zarządzania, Instytut Inżynierii Bezpieczeństwa i Jakości.

Wg OHSAS 18001:2007, sytuacja awaryjna jest szczególnym przypadkiem zdarzenia wypadkowego. Przez awarię rozumie się zdarzenie o bardzo dużych lub potencjalnie bardzo dużych stratach zarówno w odniesieniu do ludzi, jak i wyposażenia i środowiska. Wystąpienie takich zdarzeń wymaga od organizacji podjęcia specjalnych działań organizacyjnych, technicznych i ewakuacyjnych [ISRS, 2004].

Departament Bezpieczeństwa Wewnętrznego USA (Department of Homeland Security) definiuje przygotowanie na sytuacje awaryjne jako „*ciągły cykl planowania, organizowania, szkolenia, wyposażania, ćwiczenia, oceny i podejmowania działań naprawczych w celu zapewnienia skutecznej koordynacji w przypadku sytuacji awaryjnych lub podczas reagowania na incydenty*" [https://www.dhs.gov/plan-and-prepare-disasters]. Incydent w standardach dotyczących systemów zarządzania bezpieczeństwem pracy, definiowany jest jako zdarzenia powstające w związku z pracą, które mogłyby powodować lub powoduje uraz i dolegliwości zdrowotne (zaliczono do incydentów wypadki i zdarzenia potencjalnie wypadkowe) [PN ISO 45001].

Program Zarządzania Ryzykiem EPA (RMP, art 112r) wymaga oceny zagrożeń i programów reagowania na sytuacje awaryjne. Obejmuje on [https://www.epa.gov/rmp]:

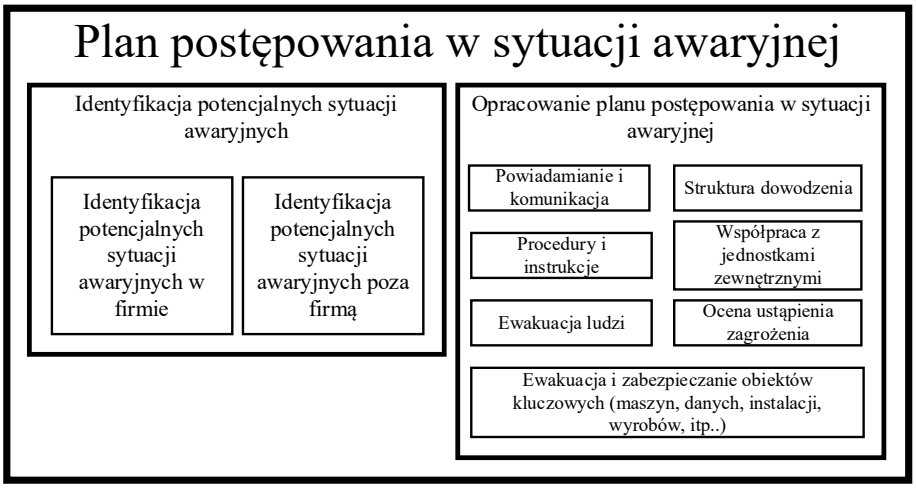
- ocenę zagrożeń, która szczegółowo przedstawia potencjalne skutki przypadkowego uwolnienia, historię wypadków z ostatnich pięciu lat, oraz ocenę scenariuszy najgorszego i alternatywnego uwolnienia;
- program zapobiegawczy obejmujący środki ostrożności oraz środki konserwacji, monitorowania i szkolenia pracowników; oraz
- program reagowania w sytuacjach awaryjnych, który określa opiekę zdrowotną w sytuacjach awaryjnych, środki szkolenia pracowników oraz procedury informowania opinii publicznej i instytucji reagowania (np. straży pożarnej) w razie wystąpienia awarii.

Jednym z ważniejszych działań, mających na celu ograniczenie kosztów incydentów, jest działanie przed zdarzeniem realizowane poprzez planowanie postępowania w sytuacjach awaryjnych będących następstwem zagrożeń [Dahlke i Idczak 2021]. Przystępując do planowania, najpierw należy dokonać identyfikacji potencjalnych sytuacji awaryjnych [Dahlke i Idczak 2021]:

- wewnątrz jednostki organizacyjnej;
- na zewnątrz jednostki organizacyjnej.

Kategorie zagrożeń wewnętrznych i zewnętrznych dla firm, stanowią integrator terminologiczny dla obszarów zarządzania bezpiecznstwem pracy i zarządzania kryzysowego. W obu tych obszarach należy poszukiwać grup zagrożeń do analizy przygotowania na sytuacje awaryjne (Rysunek 1) [Dahlke i Idczak 2021] i sytuacje kryzysowe. W literaturze wyróżniono pojęcia zarówno sytuacji kryzysowej, jak i zdarzenia kryzysowego. *Zdarzenia kryzysowe tworzą sytuacje kryzysowe o różnym tempie i czasie trwania. Sytuacja kryzysowa charakteryzuje się szczególną dynamiką zmian co do ich tempa, jak i czasu trwania. Zdarzenia kryzysowe generują w zależności od uwarunkowań ich zaistnienia konkretne skutki sytuacji kryzysowych* [Ciekanowski i Sta-

chowiak 2012]. *Sytuacja kryzysowa to zespół okoliczności zewnętrznych i wewnętrznych, wpływających na dany układ (system) w ten sposób, iż zaczyna się w nim i jest kontynuowany proces zmienny, w rezultacie czego dochodzi do zachowania równowagi, a następnie jej przywrócenia, dzięki podjętym środkom regulacji, (nadzwyczajne działania)* [Otwinowski 2010].



Rys. 1. Schemat działań realizowanych przy przygotowywaniu planu postępowania w sytuacji awaryjnej (Źródło: [Dahlke i Idczak 2021] na podstawie ISRS)

Dysponując zbiorem potencjalnych zagrożeń, trzeba przystąpić do oszacowania ich skutków i prawdopodobieństwa wystąpienia. Jeśli chcemy się przygotować na ich skutki, ograniczając straty, konieczne jest zastosowanie metod i narzędzi wspomagających decyzje i umożliwiających modelowanie symulacyjne rozwoju zdarzeń. Modelowanie symulacyjne jest procesem, realizowanym dla wybranych scenariuszy przebiegu zdarzenia i jego efekty będą zależne od prognozowanychzmian danych wejściowych [Dahlke 2020]. W dalszej części artykułu zaprezentowane zostaną przykłady modelowania symulacyjnego skutków zagrożeń dla przykładowych zdarzeń z udziałem substancji niebezpiecznych, przy wykorzystaniu aplikacji korzystających z modeli formalnych pożarów i wybuchów.

2. MODELOWANIE FORMALNE POŻARÓW I WYBUCHÓW – METODY I NARZĘDZIA

Sytuacje awaryjne powodują lub mogą powodować straty, które w literaturze dzielone są na cztery kategorie (PEME (People, Equipment, Materials, Environment)) [Lelo i Purba 2018]:

- ludzie;
- urządzenia;
- materiały;
- środowisko.

Do najważniejszych zagrożeń w zakładach przemysłowych zalicza się [Mannan 2012]:

- pożary,
- wybuchy,
- uwolnienie substancji toksycznych.

Powyższe kategorie zdarzeń są również wymieniane jako najpoważniejsze zdarzenia poza zakładem (zdarzenia zewnętrzne). Oddziaływać mogą więc bardzo szkodliwie szczególnie na infrastrukturę krytyczną, powodując znaczące straty.

Zapobieganie stratom polega na stosowaniu [Mannan 2012]:

- technik identyfikacji zagrożeń;
- ilościowego podejścia do zagrożeń;
- ilościowej oceny zagrożeń i ich oceny w odniesieniu do kryteriów ryzyka;
- technik inżynierii niezawodności;
- zasad niezależności w krytycznych ocenach i inspekcji;
- planowania na wypadek sytuacji awaryjnych;
- badania incydentów wraz z krytycznym spojrzeniem na tradycyjne praktyki lub istniejące przepisy, normy i kodeksy, jeśli wydają się one przestarzałe z powodu zmian technologicznych.

Zarządzający ryzykiem wystąpienia strat, wymaga realizacji następujących działań [Mannan 2012]:

- identyfikacja możliwych sytuacji powodujących straty;
- pomiar takich strat;
- wybór metod minimalizowania strat;
- wdrożenie metod w ramach możliwości organizacji.

Najważniejsze skutki utraty kontroli strat to między innymi [Mannan 2012]:

- przerwanie działalności,
- obrażenia ciała,
- szkody majątkowe,
- pożar,
- utrata bezpieczeństwa,
- utrata zdrowia,
- zanieczyszczenie środowiska,
- odpowiedzialność za produkt.

Czynniki, które określają skalę zagrożenia, to [Mannan 2012]:

- wielkość zapasów;
- czynnik energetyczny;
- czynnik czasu;
- stosunek intensywności do odległości;
- czynnik narażenia;

- relacje intensywności zniszczeń i intensywności obrażeń.

Przygotowując infrastrukturę krytyczną na zewnętrzne sytuacje awaryjne jak pożary, wybuchy i skażenia, konieczne jest zastosowanie narzędzi wspomagających określenie powyższych czynników skali zagrożeń. Służyć temu mogą modele symulacyjne.

Systemy modelowania zachowania się ognia i skutków pożarów odgrywają ważną rolę pomocniczą w wielu aspektach zarządzania [Andrews 2013]. Wśród narzędzi komputerowych do modelowania symulacyjnego pożarów, wybuchów i skarzeń można znaleźć przykłady dedykowane różnym odbiorcom (Tabela 1). Aplikacje takie umożliwiają wspomaganie decyzji w planowaniu przygotowania na sytuacje awaryjne, dostarczając informacji o możliwym rozwoju zdarzeń i ich skutkach.

Tabela 1

Przykłady aplikacji komputerowych możliwych do zastosowania w zarządzaniu bezpieczeństwem pożarowym i wybuchowym

Lp.	Nazwa aplikacji komputerowej	Zastosowanie i moduły narzędziowe
Pożary w środowisku naturalnym		
1	BehavePlus	Jest jednym z najczęściej używanych systemów zarządzania zagrożeniami pożarowymi w Stanach Zjednoczonych. Stosowany także w Kanadzie, Hiszpanii, Nowej Zelandii, Republice Południowej Afryki i Szkocji [Andrews 2010]. Podstawowe moduły: IGNITE - Prawdopodobieństwo zapłonu; SURFACE - zachowanie się ognia na powierzchni; CROWN - zachowanie się ognia w koronie; SAFETY - wielkość strefy bezpieczeństwa; SIZE - Rozmiar i kształt pożaru punktowego; CONTAIN - opanowanie pożaru w wyniku akcji gaśniczej; SPOT - maksymalna odległość punktowa; SCORCH - wysokość wypalania koron drzew; MORTALITY - Prawdopodobieństwo śmiertelności drzew.
2	FERGI	FERGI (Fire-Enhanced Runoff and Gully Initiation Model) to narzędzie do prognozowania erozji po pożarze. Model FERGI łączy w sobie model stochastyczny klimatyczny i deterministyczny model geomorficzny w celu oszacowania prawdopodobieństwa wystąpienia nadmiaru opadów po pożarze, przepływu szczytowego i inicjacji wąwozów w zlewniach [Nyman et al. 2013].
3	HIGRAD/FIRE TEC	HIGRAD/FIRETEC jest wielofazowym modelem transportu opartym na uśrednionych równaniach zachowania masy, pędu, energii i związków chemicznych. Łączy modele efektów makroskalowych takich procesów, jak spalanie, promieniowanie, konwekcyjna, wymiana ciepła i opór aerodynamiczny w celu uzyskania modelu atmosfery i pożaru. Aplikacja wykorzystuje metodę średnich (MOA) [Koo et al. 2012]. HIGRAD jest obliczeniowym modelem dynamiki płynów, który przedstawia przepływ powietrza i jego dostosowanie do terenu, różnych rodzajów paliwa (roślinności) i samego pożaru. FIRETEC łączy w sobie modele fizyczne reprezentujące spalanie, wymianę ciepła, opór aerodynamiczny i turbulencje [https://www.frames.gov/firetec/home].
Pożary w budynkach		

Lp.	Nazwa aplikacji komputerowej	Zastosowanie i moduły narzędziowe
4	ABAQUS	Abaqus fire interface simulator toolkit (AFIST) umożliwia analizę wytrzymałości mechanicznej konstrukcji budowlanych podczas pożaru [Feenstra et al. 2018; Luo et al. 2012];
5	ALGOR	Jest bardzo wydajnym narzędziem wykorzystującym metodę elementów skończonych do prowadzenia badań wytrzymałościowych konstrukcji budowlanych. Umożliwia między innymi prezentację rozkładu temperatur w belkach [Chythanya, 2009];
6	ANSYS Fluids	Symulacja i analiza przepływów [https://www.ansys.com/products/fluids#tab1-2];
7	CFAST	Analiza pożaru i zadymienia [Peacock et al., 2017; http://cfast.nist.gov/];
8	DETACT	DETACT-QS (DETector ACTuation - Quasi Steady) to program do obliczania czasu zadziałania urządzeń termicznych znajdujących się pod nieobciążonymi stropami. Może być stosowany do przewidywania czasu zadziałania stałotemperaturowych czujek ciepła i głowic tryskaczowych poddanych działaniu pożaru określonego przez użytkownika [https://www.nist.gov/el/fire-research-division-73300/fire-modeling-programs].
9	FIERAsystem	FIERAsystem jest modelem komputerowym służącym do oceny systemów ochrony przeciwpożarowej w budynkach przemysłowych. Model został opracowany jako narzędzie pomocne inżynierom ochrony przeciwpożarowej, urzędnikom budowlanym, pracownikom straży pożarnej i naukowcom w przeprowadzaniu obliczeń inżynierii bezpieczeństwa pożarowego i może być wykorzystywany do przeprowadzania analiz zagrożeń i ryzyka, a także do oceny, czy wybrany projekt spełnia ustalone cele w zakresie bezpieczeństwa pożarowego [Benichou et al. 2005].
10	FIRECAM	Fire Risk Evaluation and Cost Asscssmcnt Model to model komputerowy, który został opracowany w National Research Council of Canada. Model ten może być wykorzystywany do oceny zarówno ryzyka pożarowego dla życia, jak i kosztów ochrony przeciwpożarowej oraz przewidywanych strat w budynku [Dutcher et al. 1996].
11	Probabilistic Fire Simulator (PFS)	Narzędzie do analizy ryzyka, służące do obliczania rozkładów zmiennych wyjściowych modelu pożaru. Narzędzie to łączy symulację Monte Carlo i CFAST, dwustrefowy model pożaru [Hostikka i Keski-Rahkonen 2003].
12	JASMINE	Jasmine (Analysis of Smoke Movement in Enclosures) służy do modelowania pożarów w budynkach [Ma, Quintiere 2003]
13	KOBRA-3D	Aplikacja do modelowania pożarów w budynkach. Umożliwia analizownie elementów systemów bezpieczeństwa pożarowego [Fliszkiewicz et al. 2013]; Kobra-3D to program komputerowy opracowany przez firmę IST GmbH do symulacji rozprzestrzeniania się dymu i ciepła w budynkach. W przeciwieństwie do modeli strefowych, Kobra-3D opiera się na globalnych bilansach energii i masy, a także na zachowaniu pędu, co jest niezbędne do określenia przepływu w pomieszczeniu. Umożliwia to sformułowanie stwierdzeń dotyczących lokalnego rozkładu zmiennych termodynamicznych (np. obszarów lokalnie podwyższonej temperatury lub krytycznego zadymienia), które są istotne z punktu widzenia bezpieczeństwa [https://www.ist-net.de/kobra-3d/];
14	NASTRAN	Analiza wytrzymałości mechanicznej konstrukcji budowlanych podczas pożaru [Fliszkiewicz et al. 2013];
15	PHOENICS/FLAIR	PHOENICS jest oprogramowaniem CFD ogólnego przeznaczenia, które przewiduje ilościowo: jak jedno- i wielofazowe płyny (powietrze, woda, olej, itp.)

Lp.	Nazwa aplikacji komputerowej	Zastosowanie i moduły narzędziowe
		przepływają w i wokół urządzeń procesowych, budynków, elementów środowiska naturalnego oraz związane z tym zmiany składu chemicznego i fizycznego [Milanović i Bajc 2018];
16	Pyrosim	Umożliwia analizę pożaru, zadymienia oraz reakcji detektorów pożarów i systemów przeciwpożarowych oraz oddymiających [Blake et al. 2018];
17	SAFIR	Oprogramowania do nieliniowego modelowania konstrukcji w warunkach pożaru metodą elementów skończonych [Franssen i Gernay 2017];
18	SCHEMA-SI (Stochastic Computation and Hybrid Event Modelling Approach-Se´curite´Incendie	Służydo oceny ryzyka pożarowego [Muller et al. 2008], oceny skuteczności strategii bezpieczeństwa pożarowego [Muller 20105] oraz do rekonstrukcji pożaru [Muller et al. 2010].
19	SMARTFIRE	Jest środowiskiem modelowania FFM (Fire Fild Modeling), które wykorzystuje modele oparte na mechanice płynów. Oprogramowanie w pełni wspiera użytkowników będących ekspertami w dziedzinie CFD w odwzorowywniu zdarzeń pożarowych, przepływu gazówi skuteczności systemów przeciwpożarowych [Ewer et al. 2010];
20	Simcenter STAR-CCM+	Simcenter STAR-CCM+ jest wielofizycznym oprogramowaniem do obliczeniowej dynamiki płynów (CFD) do symulacji produktów działających w rzeczywistych warunkach [https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/simcenter/STAR-CCM.html; Abolghasemzadeh, Rüppel, 2012]
Pożary,wybuchy i skażenia w transporcie, magazynowaniu i przetwarzaniu substancji niebezpiecznych		
21	ALOHA	Areal Locations of Hazardous Atmospheres umożliwia analizę [Shao i Duan, 2012]: − pożarów rozlewisk, − pożarów BLEVE, − pożarów strumieniowych, − skażeń chemicznych.
22	Breeze AERMOD	AERMOD jest modelem gaussowskim, który jest zatwierdzony przez amerykańską Agencję Ochrony Środowiska (EPA) dla większości zaawansowanych scenariuszy modelowania. Dostarcza użytkownikom narzędzia i funkcje wymagane do wykonywania analiz jakości powietrza, które pomagają w rozwiązywaniu problemów związanych z pozwoleniami, regulacjami i uciążliwościami [https://www.trinityconsultants.com/]. Istnieją dwa procesory danych wejściowych, które są komponentami regulacyjnymi programu: − AERMAP - preprocesor danych terenowych; − AERMET - preprocesor danych meteorologicznych;
23	Kameleon FireEx	Kameleon FireEx - KFX® to narzędzie CFD do symulacji dyspersji, pożarów i eksplozji w strefach zagrożonych wybuchem. Oferuje symulacje konwencjonalnych pożarów strumieniowych i powierzchniowych, złożonych pożarów wielofazowych, pożarów dobrze i słabo wentylowanych, wycieków LNG, dyspersji gazów i pożarów, ograniczania pożarów z wykorzystaniem wody poprzez zalewanie, mgłę i kurtyny wodne w złożonych systemach, optymalizacji biernej ochrony przeciwpożarowej, analizy pochodni, a także

Lp.	Nazwa aplikacji komputerowej	Zastosowanie i moduły narzędziowe
		przepływów turbulentnych, dyspersji gazów i ogólnej analizy dymu w zagrożonych obszarach z uwzględnieniem wszystkich efektów pogodowych [https://www.dnv.com/];
24	BREEZE ExDam	Explosion Damage & Injury Assessment Model - jest wydajnym pakietem do modelowania skutków eksplozji 3D, który umożliwia przewidywanie obrażeń i zniszczeń powstałych w wyniku detonacji materiałów wybuchowych o dużej sile rażenia i chmur parowych. Zawiera Model Oceny Szkód Wybuchu Wysokiego Poziomu Wybuchowości (HExDAM) i Model Oceny Szkód Wybuchu Chmury Pary (VExDAM). Te modele numeryczne umożliwiają szybkie i dokładne obliczanie uszkodzeń konstrukcji i obrażeń personelu spowodowanych rozkładami nadciśnienia (OP), ciśnienia dynamicznego (DP) i bodźców (IP) [https://www.trinityconsultants.com/].
25	BREEZE Incident Analyst	Aplikacja do modelowania skutków zagrożeń związanych z przypadkowym uwolnieniem substancji chemicznych. Jest narzędziem do modelowania w celu: − poprawy bezpieczeństwa w obiekcie, − analizy ryzyka w miejscu zdarzenia, − oceny zagrożeń w czasie rzeczywistym lub rekonstrukcji zdarzeń z przeszłości. Zawiera 10 modeli szczegółowych [https://www.trinityconsultants.com/]
26	BREEZE LFG Fire/Risk	BREEZE LFG Fire/Risk umożliwia analizę potencjalnych zagrożeń związanych z uwolnieniem skroplonego gazu (LFG) i skroplonego gazu ziemnego (LNG) w wyniku awarii statku lub rurociągu. Uumożliwia również przewidywanie szybkości parowania i stężenia oparów w kierunku "downwind" dla zagrożeń wybuchowych i promieniowania cieplnego dla powstałych pożarów. LFG Fire/Risk zawiera Source5, DEGADIS i modele pożarowe, jak również intuicyjny interfejs, który prowadzi użytkowników przez wprowadzanie wymaganych i opcjonalnych danych wejściowych. BREEZE LFG Fire/Risk udostępnia użytkownikom cztery modele pożarów do wyboru: − pożar w zbiorniku zamkniętym, − pożar w zbiorniku otwartym, − BLEVE − pożar strumieniowy pionowy. Modele te umożliwiają obliczanie strumienia promieniowania cieplnego związanego z potencjalnym wybuchem i pożarem [https://www.trinityconsultants.com/];
27	CHARM	Complex Hazardous Air Release Model, umożliwia analizowanie [https://www.charmmodel.com/]: − potencjalnych, przypadkowych uwolnień niebezpiecznych substancji chemicznych (rozpraszanie i transport w powietrzu), − pożarów (BLEVE, pożar rozlewisk i pożar strumieniowy) i − wybuchów (zniszczenie mechaniczne oraz eksplozja chmury oparów w wyniku dyspersji i ruchu powietrza);
28	RizEx-2	RizEx-2 służy do obrazowania procesów fizycznych, w przypadku wystąpienia zdarzenia awaryjnego, takich jak np. dyspersja gazów, parowanie cieczy, pożar czy wybuch. Uwzględnia towarzyszące im warunki (np. warunki meteorologiczne, pokrycie terenu) [Dziechciarz et al. 2015];
29	HYSPLIT	Analiza przypadkowych lub celowych uwolnień środków: − chemicznych,

Lp.	Nazwa aplikacji komputerowej	Zastosowanie i moduły narzędziowe
		− biologicznych lub − jądrowych. Opracowany przez Air Resources Laboratory (ARL) model HYbrid Single - Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) jest narzędziem, które pomaga wyjaśnić jak, kiedy i gdzie potencjalnie szkodliwe materiały są przenoszone, rozpraszane i osadzane w atmosferze. Umożliwia: − przewidywanie ścieżki uwolnienia substancji chemicznych wspomagając ewakuację właściwych osób; − przewidywanie rozprzestrzeniania pyłu wulkanicznego wspomagając opracowywanie tras samolotów. Zrozumienie źródeł niebezpiecznych zanieczyszczeń powietrza pozwala zarządzającym jakością powietrza opracować ukierunkowane polityki i plany prewencyjne [https://www.arl.noaa.gov/hysplit/];
30	PHAST	Umożliwia [https://www.dnv.com/]: badanie wypadków i incydentów, badanie ALARP, szacowanie konsekwencji wg HAZOP, HAZID, PHA, LOPA, wprowadzenie danych o konsekwencjach do własnego narzędzia QRA, planowanie działań w sytuacjach awaryjnych, projektowanie wyposażenia, ocenę eskalacji, ocena zasięgu i dotkliwości, optymalizację lokalizacji i rozmieszczenia obiektów, klasyfikację obszarów niebezpiecznych, tworzenie raportów bezpieczeństwa, projektowanie otworów wentylacyjnych i pochodni. Wspomag modelowanie emisji mieszanin i czystych składników z: − rurociągów długich i krótkich (naziemnych lub podziemnych), − wycieków, − katastrofalnych rozerwań, − uszkodzeń zaworów nadmiarowych i dysków, − zawalenia się dachu zbiornika, − upust z przestrzeni parowej zbiornika. − uwolnienia do atmosfery w wyniku utraty szczelności wewnątrz lub na zewnątrz. Phast zawiera DNV GL's Uniied Dispersion Model (UDM), wiodący na świecie model dyspersji dla: − fazy dyspersji odrzutowej, ciężkiej i pasywnej. − dyfuzji wzdłuż wiatru/rozprzestrzeniania grawitacyjnego − wyporu (pływalności) − interakcji z podłożem − unoszenia się chmury powietrza − zatrzymanie w warstwie mieszania/inwersyjnej − tworzenie się kropel i opadów
31	Effects	EFFECTS firmy Gexcon to zaawansowane oprogramowanie do analizy skutków i konsekwencji przypadkowego uwolnienia niebezpiecznych substancji chemicznych w zakładach procesowych, chemicznych i petrochemicznych. Oblicza promieniowanie cieplne w przypadku pożarów, nadciśnienie w przypadku wybuchów, stężenia toksyczne i dawki w przypadku dyspersji i wiele innych [https://www.gexcon.com/].

Część aplikacji zawartych w powyższej tabeli (Tabela 1) oferowanych jest w wersjach bezpłatnych, oferując jednocześnie bardzo szarokie wsparcie użytkowników

podczas analiz. W kolejnym rozdziale zostanie zaprezentowany przykład zastosowania takiego oprogramowania do wspomagania przygotowania na wybrane sytuacje awaryjne obejmujące infrastrukturę krytyczną.

3. WYNIKI BADAŃ

Przykładowa analiza skutków zagrożeń została wykonana dla Politechniki Poznańskiej i budynków Kampusu Warta. Ocenę przeprowadzono dla wybranych scenariuszy zdarzeń w transporcie materiałów niebezpiecznych (drogowym i przesyłowym gazu). Do najważniejszych parametrów warunkujących liczbę scenariuszy, należą:

- rodzaj i stan skupienia substancji niebezpiecznej (gaz, ciecz, gaz skroplony);
- ilość substancji niebezpiecznej (masa i objętość substancji; poziom wypełnienia cysterny; ilość substancji tworzącej skutki zdarzenia, itd.);
- warunki uwolnienia substancji (natychmiastowe, powolne; zapłon substancji lub brak zapłonu);
- lokalizacja zdrzenia (ukształtowanie terenu wokół miejsca zdarzenia; osłonięcie miejsca zdarzenia);
- warunki pogodowe (temperatura powietrza, wilgotność powietrza, kierunek wiatru, inwersja).

Wielość kryteriów sprawia, że liczba wariantów jest trudna do oszacowania, nawet przy założeniu wyboru najgorszych przypadków.

Podczas analizy wykorzystano system CAMEO z plikacją ALOHA oraz mapą MARPLOT (Esri).

Scenariusze transportowe mogą uwzględniać przemieszczanie substancji niebezpiecznych:

- ulicami na zewnątrz Kampusu Warta (ul.: Jana Pawła II, Kórnicka, Berdychowo, Piotrowo, Królowej Jadwigi, Serafitek) – uwzględnienie niektórych ulic przyjęto przy założeniu złamania zakazu wjazdu samochodów ciężarowych;
- drogami wewnętrznymi na terenie Kampusu (dostawa substancji na teren Uczelni).

Parametry scenariuszy sytuacji awaryjnych zaprezentowano w tabelach (Tabela 2, Tabela 3). Przykładowe miejsca zdzrzeń zaprezentowano na rysunku (
Rys. 1).

Tabela 2

Charakterystyka scenariuszy sytuacji awaryjnych związanych z transportem drogowym substancji niebezpiecznych

L.p.	Nazwa prametru	Scenariusz 1	Scenariusz 2	Scenariusz 3
1	Nazwa substancji	Propan [74-98-6]	Propan [74-98-6]	Propan [74-98-6]
2	Objętość cysterny [m3]	34	34	34
3	Średnica zbiornika [m]	2	2	2

L.p.	Nazwa prametru	Scenariusz 1	Scenariusz 2	Scenariusz 3
4	Wypełnienie cysterny [%] *	90	90	90
5	Liczba komór cysterny	1	1	1
6	Sposób uwolnienia substancji	otwór [2m x 0,15 m]	rozerwanie cysterny	otwór [0,5m x 0,05 m]
7	Rodzaj zdarzenia	skażenie (bez zapłonu)	BLEVE	pożar strumieniowy
8	Ilość substancji w zdarzeniu	231 kg/s	100%	26800 kg/min
9	Temperatura powietrza [°C]	30	30	30
10	Wilgotność względna [%]	40	40	40
11	Prędkość wiatru [m/s]	1	1	1
12	Kierunek wiatru	W	W	W
13	Zachmurzenie [od 0 do 10]	0	0	0
14	Klasa stabilności [od A do F]	B	B	B
15	Inwersja [Tak/Nie]	Nie	Nie	Nie
16	Lokalizacja zdarzenia	52°24'22,56"N 16°57'14,05"E	52°24'22,56"N 16°57'14,05"E	52°24'22,56"N 16°57'14,05"E

* Parametr obliczono dla badanej substancji wg Rozporządzenia Ministra Gospodarki z dnia 27 grudnia 2007 r. w sprawie wymagań, którym powinny odpowiadać drogowe cysterny pomiarowe, oraz szczegółowego zakresu badań i sprawdzeń wykonywanych podczas prawnej kontroli metrologicznej tych przyrządów pomiarowych (Dz.U. 2008 nr 4 poz. 22)

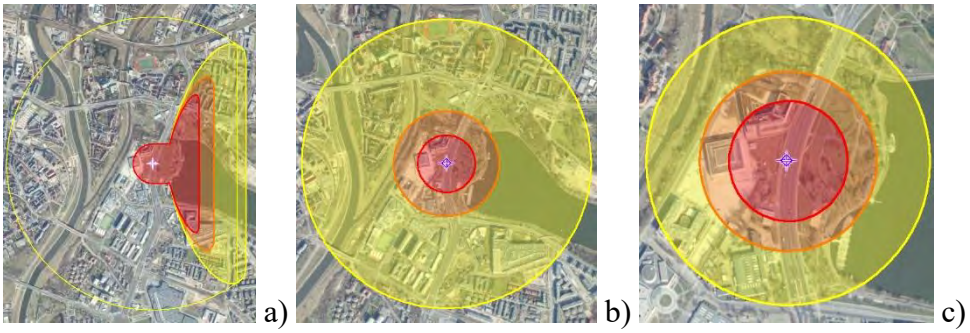
Tabela 3

Charakterystyka scenariuszy sytuacji awaryjnych związanych z siecią gazową

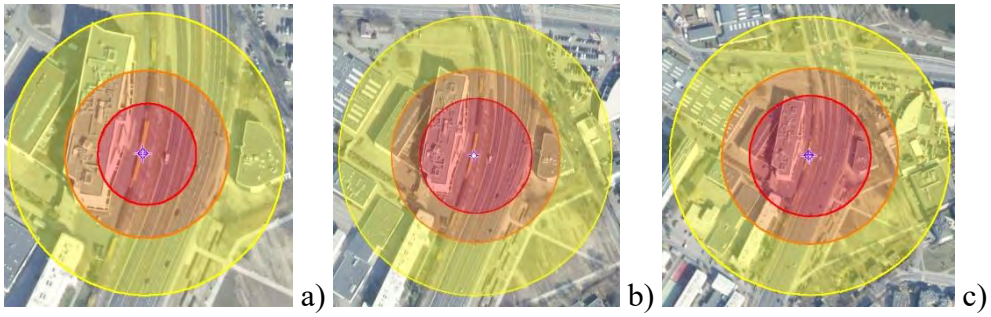
L.p.	Nazwa prametru	Scenariusz 4	Scenariusz 5	Scenariusz 6
1	Nazwa substancji	Metan [74-82-8]	Metan [74-82-8]	Metan [74-82-8]
2	Średnica rurociągu [m]	0,5	0,5	0,5
3	Ciśnienie przyjęte w analizie [Pa]	202650*	601325**	1701325***
4	Sposób uwolnienia substancji	otwór	otwór	otwór
5	Rodzaj zdarzenia	pożar strumieniowy	pożar strumieniowy	pożar strumieniowy
6	Temperatura powietrza [°C]	30	30	30
7	Wilgotność względna [%]	40	40	40
8	Prędkość wiatru [m/s]	1	1	1
9	Kierunek wiatru	W	W	W
10	Zachmurzenie [od 0 do 10]	0	0	0
11	Klasa stabilności [od A do F]	B	B	B
12	Inwersja [Tak/Nie]	Nie	Nie	Nie
13	Lokalizacja zdarzenia	52°24'08,29"N 16°57'14,56"E	52°24'08,29"N 16°57'14,56"E	52°24'08,29"N 16°57'14,56"E

* Minimalne ciśnienie w rurociągu wynosi wg ALOHA 2 x normalne ciśnienie atmosferyczne (101325 Pa); ** Przyjęto wartość dla gazociągów podwyższonego ciśnienia równą 0,5 MPa + normalne ciśnienie atmosferyczne (101325 Pa); *** Przyjęto wartość dla gazociągów wysokiego ciśnienia równą 1,6 MPa + normalne ciśnienie atmosferyczne (101325 Pa);

Rys. 2. Widok Kampusu Warta z zaznaczonymi budynkami i głównymi drogami (Źródło: opracowanie własne na podstawie [https://polska.e-mapa.net/])



Rys. 3. Prezentacja stref zagrożenia przygotowana w aplikacji CAMEOfm i ALOHA dla: a) scenariusza 1 (strefa czerwona – AEGL-3 (60 min): 33000 ppm; strefa pomarańczowa – AEGL-2 (60 min): 17000 ppm; strefa żółta – AEGL-1 (60 min): 5500 ppm); b) scenariusz 2 (strefa czerwona - >37,5 kW/m^2; strefa pomarańczowa – 12,5 kW/m^2; strefa żółta – 1,6 kW/m^2); c) scenriusz 3 (strefa czerwona – 10 kW/m^2; strefa pomarańczowa – 5 kW/m^2; strefa żłóta – 2 kW/m^2)



Rys. 4. Prezentacja stref zagrożenia przygotowana w aplikacji CAMEOfm i ALOHA dla: a) scenariusza 4; b) scenariusz 5; c) scenriusz 6; strefa czerwona – 10 kW/m^2; strefa pomarańczowa – 5 kW/m^2; strefa żłóta – 2 kW/m^2

Ocena szkodliwości przebywania w strefach wokół zdarzenia może uwzględniać szereg oddziaływań:

- narażenie toksyczne;
- promieniowanie cieplne [kW/m^2] (Tabela 4),
- energię fali uderzeniowej [J],
- energia elementów niesionych z falą uderzeniową,
- wzrost ciśnienia [Pa].

W programie ALOHA określono domyślne dopuszczalne wartości narażenia toksycznego w oparciu o następującą hierarchię skal [ALOHA 2016; Jones et al. 2013; https://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/chemical-spills/resources/levels-concern.html]:

- AEGL (Acute Exposure Guideline Levels),
- ERPG (Emergency Response Planning Guidelines),
- TEELs (Temporary Emergency Exposure Limits),
- PAC - zbiór danych łączy w sobie wszystkie trzy powszechnie stosowane systemy wytycznych dotyczących narażenia (AEGL, ERPG i TEEL) i wprowadza system oparty na hierarchii. (AEGL są używane preferencyjnie, następnie ERPG, a potem TEEL),
- IDLH są stosowane, gdy dla danej substancji chemicznej nie zdefiniowano żadnych wytycznych dotyczących narażenia.

W skali AEGL, występują trzy poziomy [ALOHA 2016; Jones et al. 2013]:

- AEGL-3 to stężenie w powietrzu, wyrażone w częściach na milion (ppm) lub miligramach na metr sześcienny (mg/m3), substancji, powyżej którego przewiduje się, że u ogółu populacji, w tym u osób podatnych, mogą wystąpić zagrażające życiu skutki zdrowotne lub śmierć.
- AEGL-2 to stężenie w powietrzu (wyrażone w ppm lub mg/m3) substancji, powyżej którego przewiduje się, że u ogółu ludności, w tym u osób wrażliwych, mogą wystąpić nieodwracalne lub inne poważne, długotrwałe niekorzystne skutki dla zdrowia lub upośledzenie zdolności ucieczki.

− AEGL-1 to stężenie substancji w powietrzu (wyrażone w ppm lub mg/m3), powyżej którego przewiduje się, że populacja ogólna, w tym osoby podatne na narażenie, może odczuwać znaczny dyskomfort, podrażnienie lub pewne bezobjawowe, niewrażliwe skutki. Efekty te jednak nie powodują inwalidztwa, są przemijające i odwracalne po zaprzestaniu narażenia.

Oceniając szkodliwość pożaru BLEVE, konieczne jest możliwość wystąpienia obok promieniowania cieplnego, także fali uderzeniowej i przemieszczania z nią elementów. Ocena oddziaływania promieniowania cieplnego powinna uwzględniać względnie krótki czas trwania spalania (Tabela 4).

Tabela 4

Kryterium szkodliwości promieniowania cieplnego podczas pożaru BLEVE [Wang et al. 2017]

Intensywność promieniowania cieplnego (kW/m^2)	Rodzaj obrażeń	Rodzaj uszkodzeń	Stopień szkodliwości
>37.5	śmierć	sprzęt operacyjny uległ całkowitemu zniszczeniu	fatalny
25	oparzenia trzeciego stopnia	zapłon drewna	poważny
12.5	oparzenia drugiego stopnia	tworzywa sztuczne stopione	umiarkowany
4.0	oparzenie pierwszego stopnia		niewielki
<1.6	bezpieczne		bezpieczny

Efekt modelowania w postaci stref zagrożeń (Rys. 3, Rys. 4), może posłużyć do przygotowania planów postępowania w sytuacji awaryjnej. Powinny one obejmować między innymi [PN-ISO 45001; ISRS 2004; KPZK 2022]:

− identyfikację zagrożeń i potencjalnych sytuacji awaryjnych,
− opracowanie map ryzyka na podstawie map zagrożeń,
− procedury zawiadamiania o sytuacji awaryjnej,
− instrukcje postępowania dla pracowników,
− ewakuację ludzi ze zidentyfikowanych stref zagrożeń.

W badanym przypadku analizy muszą być rozszerzone o:

− wykaz rodzajów i ilości materiałów niebezpiecznych transportowanych w pobliżu;
− uwzględnienie wiatrogramów (diagramów wiatrów) w okresach rocznych;
− uwzględnienie skrajnych warunków atmosferycznych;

Wielowariantowość scenariuszy sprawia trudności związane z pracochłonnością procesu wnioskowania. Konieczne jest zatem stosowanie trymowania danych wejściowych, np. bazując na wartościach skrajnych (np. podczas modelowania BLEVE, można przyjmować teoretycznie udział 100% substancji w wytworzeniu płomienia

kulistego). Zwiększy to strefę zagrożenia, ale utworzy jednocześnie dodatkową strefę bezpieczeństwa.

Po identyfikacji możliwych sytuacji awaryjnych poza badaną jednostką organizacyjną, konieczne jest wdrożenie systemu monitorowania zagrożeń. Działanie to wymusza nawiązanie współpracy z instytucjami zewnętrznymi, jak chociażby z operatorami sieci gazowej. Dobra współpraca powinna skutkować wymianą informacji, które umożliwią prowadzenie anliz zagrożeń i przygotowanie się na awarie.

Każdy system przygotowania na sytuacje awaryjne wymaga wdrożenia, którego podstawą jest ustalenie standardów (co i jak kontrolować/mierzyć?; wg jakich kryteriów oceniać, itd.) i przeszkolenie pracowników. Chcąc utrzymać efektywność systemu, konieczne są również ćwiczenia działań poznanych na szkoleniach. Można ocenić, że system nie będzie funkcjonował, jeśli pracownicy nie będą znali procedur i instrukcji i nie będą prawidłowo reagować na sytuacje awaryjne.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wiele standardów z zakresu zrządzania bezpieczeństwem wymaga przygotowania do sytuacji awaryjnych [Dahlke 2013]. Najczęściej identyfikacja takich sytuacji ograniczana jest do wewnętrznych źródeł zagrożeń. Paradoksalnie w wielu firmach funkcjonują systemy zarządzani bezpieczeństwem „ślepe" na zgrożenia zewnętrzne. Nieliczne wytyczne dla systemów bezpieczeństwa wymagają wprost identyfikacji zagrożeń na zewnątrz zakładu. Jest to np. ISRS. Przygotowanie na sytuacje awaryjne Uczelni jako infrastruktury krytycznej, wymaga identyfikcji zagrożeń zarówno wewnętrznych jak i zewnętrznych. Wdrożenie tego systemu wymaga przygotowania i zaangażowania w działania zarówno wszystkich pracowników jak i studentów. Jednym z ważniejszych zdań, które pojawiają się w systemach zrządzania bezpieczeństwem uczelni w Australii jest budowa systemu zgłaszania niezgodności. Budowa takiego podsystemu uzupełniłaby przepływ informacji między pracownikami i studentami, umożliwiając analizowanie liczności zdarzeń potencjalnie wypadkowych. Przykład koncepcji takiego podsystemu dedykowanego dla domów studenckich, bazującego na stronie internetowej, opracowano na Wydziale Inżynierii Zarządzania (Rys. 5) [Przybyłek i Szymoniak 2013].

Rys. 5. Przykład okna dialogowego serwisu eWypadek
(Źródło: Przybyłek i Szymoniak 2013)

Projekt składa się z 17 okien dialogowych umożliwiających zbieranie informacji o niezgodnościach zuważonych zarówno wewnątrz ja i na zewnątrz obiektów Politechniki. Informacje płynące z systemu stanowić mogą cenne źródło danych o bezpieczeństwie na poziomie zarówno minitorowania jak i reagowania na zagrożenia.

LITERATURA

1. Abolghasemzadeh P., Rüppel U., 2012, A Cloud System for Numerical Fire Simulations, International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS Vol:12, nr 04.
2. ALOHA. Example Scenarios, National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Environmental Protection Agency, September 2016.
3. Andrews P., 2010. Do you BEHAVE?-Application of the BehavePlus fire modeling system. W: Wade, Dale D.; Robinson, Mikel L., eds. Proceedings of 3rd Fire Behavior and Fuels Conference; 25-29 October 2010; Spokane, WA. Birmingham, AL: International Association of Wildland Fire, s. 17.
4. Andrews P. L., 2013,. Current status and future needs of the BehavePlus Fire Modeling System. International Journal of Wildland Fire, 23(1), s. 21-33.
5. Benichou N., Kashef A. H., Reid I., Hadjisophocleous G. V., Torvi D. A., Morinville G., 2005, FIERAsystem: A Fire Risk Assessment Tool to Evaluate Fire Safety in Industrial Buildings and Large Spaces. Journal of Fire Protection Engineering, 15(3), s. 145–172.
6. Blake P., Phylaktou H., Andrews, G., 2018, Validating FDS against a full-scale fire test. Technical report, University of Leeds, West Yorkshire.

7. Chythanya M., 2009, Finite element analysis on the effect of fire for specified duration, on a reinforced concrete beam with varied boundary conditions, Electronic Theses, Treatises and Dissertations, Florida State University Libraries, s. 91.
8. Ciekanowski Z., Stachowiak Z., 2012, Klęski żywiołowe jako przesłanki sytuacji nadzwyczajnych. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Przyrodniczo-Humanistycznego w Siedlcach Seria: Administracja i Zarządzanie, 95, s. 375-398.
9. Dahlke G., 2013, Zarządzanie bezpieczeństwem pracy i higieną pracy. Modele systemowego zarządzania bhp, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań, s. 175, ISBN 978-83-7775-248-7.
10. Dahlke G., 2020, The Anthropometric Criterion in Modeling of Evacuation, [in:] Business Informatics, Publishing House of Wroclaw University of Economics, 1 (55), s. 21-37.
11. Dahlke G., Idczak K., 2021, Modelowanie warunków ewakuacji w organizowaniu przygotowania na sytuacje awaryjne na przykładzie domu pomocy społecznej, [w:] Bezpieczeństwo osób starszych w przestrzeni miejskiej. Analiza doświadczeń, wnioski i rekomendacje z uwzględnieniem okresu pandemii SARS-CoV-2 / red. Mikołaj Tomaszyk: FNCE, 2021, s. 481-504.
12. Dutcher C. R., Hadjisophocleous G. V., Yung D., 1996, FiRECAM System Model Documentation. National Fire Laboratory, Institute for Research in Construction, National Research Council Canada.
13. Dziechciarz A., Lesiak P., Bąk D., 2015, Analiza możliwości wykorzystania programu RizEx-2 w symulacji przebiegu zdarzenia awaryjnego na przykładzie wybuchu gazu w Port Hudson, BiTP Vol. 38 Issue 2, 2015, s. 143–155.
14. Ewer J., Galea E. R., Patel M., Jia F., Grandison A., Wang Z., 2010, SMARTFIRE-the fire field modelling environment. In The Fifth European Conference on Computational, Fluid Dynamics, ECCOMAS CFD 2010. Lisbon, Portugal.
15. Feenstra J. A., Hofmeyer H., van Herpen R. A. P., Mahendran M., 2018, Automated two-way coupling of CFD fire simulations to thermomechanical FE analyses at the overall structural level. Fire Safety Journal, 96, s. 165-175.
16. Franssen J.-M., Gernay T., 2017, "Modeling structures in fire with SAFIR®: theoretical background and capabilities", Journal of Structural Fire Engineering, Vol. 8 No. 3, s. 300-323.
17. Fliszkiewicz M., Krauze A., Maciak T., 2013, Możliwości stosowania programów komputerowych w inżynierii bezpieczeństwa pożarowego. [w]: Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza, 1, s. 47-60.
18. Hostikka S., Keski-Rahkonen O., 2003, Probabilistic simulation of fire scenarios, Nuclear Engineering and Design, Volume 224, Issue 3, s. 301-311, ISSN 0029-5493.
19. https://app-1knovel-1com-1000024bx0a5f.han3.library.put.poznan.pl/hotlink/pdf/id:kt00BFDEL9/lees-loss-prevention/safety-environmental
20. http://cfast.nist.gov/
21. https://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/chemical-spills/resources/levels-concern.html
22. https://www.ansys.com/products/fluids#tab1-2
23. https://www.arl.noaa.gov/hysplit/
24. https://www.dhs.gov/plan-and-prepare-disasters
25. https://www.dnv.com/services/fire-simulation-software-cfd-simulation-kameleon-fireex-kfx-110598

26. https://www.dnv.com/software/services/plant/consequence-analysis-phast.html
27. https://www.epa.gov/rmp
28. https://www.frames.gov/firetec/home
29. https://www.gexcon.com/products-services/effects-consequence-modelling-software/
30. https://www.charmmodel.com/
31. https://www.ist-net.de/kobra-3d/
32. https://www.trinityconsultants.com/software/explosion/exdam
33. https://www.trinityconsultants.com/software/dispersion/aermod
34. International Safety Rating System (ISRS) (wersja 3.1, 2004 r.).
35. International Safety Rating System (ISRS) (wersja 7).
36. Jones R.W., Lehr D., Simecek-Beatty R., Reynolds M., 2013, ALOHA® (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) 5.4.4: Technical Documentation. U. S. Dept. of Commerce, NOAA Technical Memorandum NOS OR&R 43. Seattle, WA: Emergency Response Division, NOAA. s. 96.
37. Koo E., Linn R. R., Pagni P. J., Edminster C. B., 2012, Modelling firebrand transport in wildfires using HIGRAD/FIRETEC. International journal of wildland fire, 21(4), s. 396-417.
38. Krajowy Plan Zarządzania Kryzysowego (KPZK), Aktualizacja 2021/2022, Część A, https://www.gov.pl/web/rcb/krajowy-plan-zarzadzania-kryzysowego (dostęp w dniu 20 czerwca 2022).
39. Luo C., Lua J., DesJardin P., 2012, Thermo-mechanical damage modeling of polymer matrix sandwich composites in fire. Composites. Part A, Applied Science and Manufacturing, 43(5), s. 814-821.
40. Ma T. G., Quintiere J. G., 2003, Numerical simulation of axi-symmetric fire plumes: accuracy and limitations. Fire Safety Journal, 38(5), s. 467-492.
41. Mannan S., 2012, Lees' Loss Prevention in the Process Industries, Volumes 1-3 - Hazard Identification, Assessment and Control (4th Edition) - 1.3 Safety and Environmental Concerns. Elsevier. Retrieved from https://app-1knovel-1com-1000024bx0a71.han3.library.put.poznan.pl/hotlink/toc/id:kpLLPPIVH2/lees-loss-prevention/lees-loss-prevention.
42. Milanović S., Bajc T., 2018, The thermal comfort impact on occupants' working productivity loss in offices. Zbornik Međunarodnog kongresa o KGH, 49(1), s. 273-277.
43. Muller A., Demouge F., Brilhac J.F., Fromy P., 2008, Sécurité Incendie: développement d'une approche de modélisation stochastique hybride, Proceedings du congres Maˆıtrise des Risques Et Surete´ de Fonctionnement, dit Lambda-Mu. Avignon.
44. Muller A., 2010, Développement d'une méthode de modélisation pour l'évaluation de la performance de stratégies de sécurité incendie, Doctoral dissertation, Universite´ de Haute-Alsace, Mulhouse.
45. Muller A., Demouge F., Fromy P., Jeguirim M., Brilhac J.F., Vantelon J.P., 2010, The use of a stochastic fire safety engineering tool for fire scene reconstruction. Proceedings of the 2010 Interflam Congress, Nottingham.
46. Nyman P., Sheridan G. J., Lane P. N. J., 2013, Hydro-geomorphic response models for burned areas and their applications in land management. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 37(6), s. 787–812.
47. OHSAS 18001:2007 Systemy zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy. Specyfikacja, DNV Poland, Gdańsk.
48. Otwinowski W., 2010, *Kryzys i sytuacja kryzysowa*, Przegląd Naukowo-Metodyczny, Edukacja dla Bezpieczeństwa nr 2, s. 83-89.

49. Peacock R. D., Reneke P. A., Forney G. P., 2017, CFAST–Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 7) Volume 2: User's Guide. NIST Technical Note 1889v2.
50. PN-ISO 45001:2018-06 Systemy zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy - Wymagania i wytyczne stosowania.
51. Przybyłek I., Szymoniak M., 2013, System zarządzania bezpieczeństwem w Domu Studenckim. Przykład praktyczny. Praca dyplomowa inżynierska napisana pod kierunkiem dr inż. Grzegorza Dahlke, Wydział Inżynierii Zarządzania, Poznań, s. 167.
52. Reniers G.L.L., Ale B.J.M., Dullaert W., Foubert B., 2006, Decision support systems for major accident prevention in the chemical process industry: A developers' survey, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 19(6), s. 604-620.
53. Rian Kjell E., Evanger T., Vembe Bjørn E., Lilleheie Nils I., Lakså B., Hjertager Bjørn H., Magnussen Bjørn F., 2016, Coherent Computational Analysis of Large-Scale Explosions and Fires in Complex Geometries – From Combustion Science to a Safer Oil and Gas Industry, Chemical Engineering Transactions, 48, s. 175-180.
54. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 27 grudnia 2007 r. w sprawie wymagań, którym powinny odpowiadać drogowe cysterny pomiarowe, oraz szczegółowego zakresu badań i sprawdzeń wykonywanych podczas prawnej kontroli metrologicznej tych przyrządów pomiarowych (Dz.U. 2008 nr 4 poz. 22).
55. Shao H., Duan G., 2012, Risk quantitative calculation and ALOHA simulation on the leakage accident of natural gas power plant. Procedia Engineering, 45, s. 352-359.
56. Wang K., Liu Z., Qian X., Huang P., 2017, Long-term consequence and vulnerability assessment of thermal radiation hazard from LNG explosive fireball in open space based on full-scale experiment and PHAST, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 46, s. 13-22.

FORMAL FIRE AND EXPLOSION MODELS FOR CRITICAL INFRASTRUCTURE EMERGENCY PREPAREDNESS

Abstract

The article presents an example of the use of formal models of fire, explosions and pollution in the process of creating emergency preparedness plans for critical infrastructure. The guidelines for preparing such plans are an element of security management systems enshrined in national and international standardisation. Such plans are the equivalent of crisis management plans, but apply to organisations that seek to effectively manage the risks of loss incidents.

Keywords: emergency situation, fire modelling, explosion modelling, dispersion modelling

Przemysław DAROSZEWSKI*
Juliusz HUBER**

NOWA „NORMALNOŚĆ" W OCHRONIE ZDROWIA – WPŁYW EPIDEMII SARS-COV 2 NA REALIZACJĘ KONTRAKTU PODMIOTU LECZNICZEGO W ASPEKCIE ZARZĄDZANIA SZPITALEM UNIWERSYTECKIM

Normalność to w najogólniejszym sformułowaniu stwierdzenie nieodbiegania od przyjętych norm. W artykule autor stara się przeprowadzić ocenę, w oparciu o retrospektywną analizę decyzji, zachowań, działań oraz wykorzystywania dostępnych prawem możliwości zarówno przez jednostki centralne jak i poziomu regionalnego podczas epidemii SARS-CoV2. Powyższe działania miały w opinii autora bezpośredni wpływ na dostęp obywateli do świadczeń medycznych, a człowiek jest głównym odbiorcą infrastruktury krytycznej, która zgodnie z definicją powinna mu służyć. Czy, a jeśli tak to jaki wpływ na realizację kontraktów na świadczenia medyczne mogły mieć omawiane działania?

Słowa kluczowe: epidemia, sars-cov2

1. WPROWADZENIE

Infrastruktura krytyczna – termin używany w odniesieniu do zasobów mających podstawowe znaczenie dla funkcjonowania społeczeństwa i gospodarki. Zwykle z tym terminem są kojarzone środki:

- do produkcji, przesyłania i dystrybucji energii elektrycznej (energetyka);
- do produkcji, transportu i dystrybucji paliw gazowych;
- do produkcji, transportu i dystrybucji ropy naftowej i produktów ropopochodnych;
- telekomunikacji (komunikacji elektronicznej);

* Zakład Organizacji i Zarządzania w Opiece Zdrowotnej, Uniwersytet Medyczny im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu

** Zakład Patofizjologii Narządu Ruchu, Uniwersytet Medyczny im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu

- gospodarki wodnej (woda pitna, ścieki, wody powierzchniowe);
- do produkcji i dystrybucji żywności;
- do ogrzewania (paliwo, ciepłownie);
- ochrony zdrowia (szpitale);
- transportu (drogi, kolej, lotniska, porty);
- instytucji finansowych (banki);
- służb bezpieczeństwa (policja, wojsko, ratownictwo)[1].

W Polsce podstawę prawną do zajmowania się infrastrukturą krytyczna tworzy Ustawa o zarządzaniu kryzysowym, zawierająca definicję, w myśl której przez infrastrukturę krytyczną „należy rozumieć systemy oraz wchodzące w ich skład powiązane ze sobą funkcjonalnie obiekty, w tym obiekty budowlane, urządzenia, instalacje, usługi kluczowe dla bezpieczeństwa państwa i jego obywateli oraz służące zapewnieniu sprawnego funkcjonowania organów administracji publicznej, a także instytucji i przedsiębiorców" [2]. Na szczeblu krajowym ochrona infrastruktury krytycznej jest koordynowana przez Rządowe Centrum Bezpieczeństwa. Jak widać na powyższym zestawienie jednym z elementów infrastruktury krytycznej jest ochrona zdrowia i w konsekwencji człowiek dla którego ta dziedzina została stworzona poprzez służbę dla jego dobrostanu.

2. NOWA RZECZYWISTOŚĆ

Sytuacje, zdarzenia nieprzewidywalne, czasami o charakterze kataklizmów, a do takich należy epidemia SARS-CoV 2 stają się wyzwaniem dla podmiotów odpowiedzialnych za bezpieczeństwo infrastruktury krytycznej. Kolejny nawrót fali epidemii SARS – CoV 2 na wiosnę 2020 roku spowodował „wysyp" aktów prawnych o charakterze ustaw, rozporządzeń, decyzji, komunikatów czy też zaleceń. W szczególności te ostatnie wywoływały wiele zainteresowania na poły ze zdziwieniem. Zgodnie ze słownikiem języka polskiego PWN:

- zalecenie «to, co zostało komuś zalecone»
- zalecić — zalecać
    1. «doradzić wykonanie czegoś»
    2. «wskazać na zalety czegoś lub kogoś [3].

Czy w sytuacji kryzysu należy stosować takie narzędzia? Minister Zdrowia informował o wydanym przez NFZ w dniu 21.03.2020 komunikacie, w którym:
„W celu ograniczenia zużycia zapasów krwi i preparatów krwiopochodnych, Centrala NFZ zaleca w okresie od 23 do 29 marca 2020r. stopniowe ograniczanie przyjęć, a do 30 marca br. Wstrzymanie przyjęć pacjentów na zabiegi operacyjne wykonywane planowo, w szczególności:

- Endoprotezoplastyki dużych stawów;
- Duże zabiegi korekcyjne kręgosłupa;

- Zabiegi naczyniowe na aorcie brzusznej i piersiowej;
- Pomostowanie naczyń wieńcowych;
- Nefrektomia;
- Histerektomia"

Powyższy komunikat wzbudził znaczące zamieszenie wśród świadczeniodawców, tym bardziej, że Regionalna Stacja Krwiodawstwa i Krwiolecznictwa w Poznaniu nie zgłaszała tego typu problemów. Smaku tej sytuacji dodał fakt wystąpienia po około 3 miesiącach MZ, potwierdzającego, iż były to tylko zalecenia, a decyzja ostateczna zawsze pozostaje w gestii kierownika podmiotu leczniczego.

Kolejny komunikat Centrali NFZ z dnia 24.03.20 zwracał uwagę, że teleporady mogą być udzielane, wyłącznie w sytuacjach, gdy ocena stanu zdrowia i zakres niezbędnych czynności do zrealizowania na rzecz pacjenta, nie wymaga osobistej obecności personelu medycznego. W związku z powyższym nie dopuszczalne jest bezpodstawne całkowite zamykanie miejsc udzielających świadczeń, a tym samym pozbawianie pacjentów podstawowej opieki zdrowotnej lub ambulatoryjnej opieki specjalistycznej. Efektem takiego postepowania stał się wzrost liczby osób zgłaszających się do Szpitalnych Oddziałów Ratunkowych i Izb Przyjęć, co zwiększało ryzyko transmisji infekcji COViD 19 na personel medyczny i pacjentów.

2.1. Dostępność do świadczeń medycznych

Analiza dostępności do świadczeń medycznych w okresie pandemii była i jest utrudniona ze względu na brak publikacji przez MZ i NFZ statystyk o zrealizowanych świadczeniach . Dostępne w 2020 roku dane opublikowane przez NFZ kończyły się na 2018 roku, nie było opublikowanych danych z 2019 ani tym bardziej danych bieżących z 2020.

W porównaniu do analogicznych okresów w roku 2019 ilość udzielanych świadczeń znacząco spadła. W zakresie chirurgii ogólnej, w marcu spadła o 38%, a w kwietniu już o ponad 70%. Podobnie stało się w ortopedii, choć część szpitali nie dostosowując się do „zaleceń" nie ograniczyła tak mocno realizacji. Mniejszy spadek odnotowała kardiologii i kardiochirurgia, choć to bardziej wynik faktu, że większość przyjęć do szpitala w tym zakresach wiązało się z ratowaniem życia. Gdyby przyjąć, że niewiele ponad 30% to hospitalizacje świadczenia planowe, to właśnie taki spadek odnotowały w marcu 2020 te specjalności.

Ostatni opublikowany raport GUS „Zdrowie i ochrona zdrowia w 2018 r.", zawierający dane dotyczące do kadry medycznej wskazuje na ogólny deficyt w zakresie liczebności kadr medycznych, nierównomierne jej rozmieszczenie i niekorzystną strukturę wieku osób wykonujących świadczenia medyczne. Co prawda wzrasta liczba osób posiadających uprawnienia do wykonywania poszczególnych zawodów, przy czym największy przyrost w 2018 r, zarejestrowano w grupie lekarzy dentystów (wzrost o 2,4%), lekarzy (wzrost o 2,1%) oraz diagnostów laboratoryjnych (wzrost

o prawie 2%), ale nie przekłada się to na liczby osób wykonujących zawód medyczny, gdzie trend jest odwrotny.

2.2. Finansowanie świadczeń

Szpitale przez pierwszy okres epidemii realizowały świadczenia w trybie „ostro dyżurowym", znacznie obniżając realizację świadczeń, niekiedy jej wręcz zaprzestając. Nałożone dodatkowe rygory sanitarne zmniejszyły efektywność szpitali w udzielaniu świadczeń – praktycznie uniemożliwiając tym samym nadrobienie zaległości w ich udzielaniu. Nawet gdyby od razu zgłosili się wszyscy pacjenci, którym przesunięto terminy realizacji świadczeń, co oczywiście było nie możliwe z powodu ogromnej ilości rezygnacji z wykonania świadczeń przez samych pacjentów. W początkowym okresie epidemii procent rezygnacji sięgał w niektórych zakresach do 70 ."Odmrożenie" szpitali trwało bardzo długo, w niektórych przypadkach w konsekwencji redukcji kontraktów przez NFZ jednostki nie osiągnęły maksymalnej efektywności. Szpitale ponosiły istotne dodatkowe koszty w zakresie zaopatrzenia w środki ochrony osobistej i dezynfekcyjne oraz dostosowanie infrastruktury. Czy można pokusić i oszacować te wartości? Według wstępnych ocen koszty sięgały od 1% do 2% wartości kontraktu z NFZ. Można założyć, że podwyższenie ceny punktu rozliczeniowego o 3% od 01 stycznia 2020 pozostawiło do dyspozycji świadczeniodawców odpowiednie środki i zrekompensowało wydatki na cel.

2.3. Próby strategii ogólnej

1. Ograniczenie rozprzestrzeniania epidemii poprzez maksymalne zmniejszenie liczby kontaktów pomiędzy ludźmi i dystansowanie liczby zakażeń.
2. Opóźnianie nieuniknione wzrostu liczby zachorowań po to aby przygotować służbę zdrowia na przyjęcie dużej liczby chorych.
3. Wytrzymanie do spodziewanego szczytu zachorowań.
4. Uruchomienie większej liczby ośrodków dysponujących Extracorporeal Membrane Oxygenetion (ECMO) - Ciągłe pozaustrojowe natlenianie krwi.
5. Próby przesuwania kolejek dla chorych na inne choroby, leczenie tylko w nagłych przypadkach.

Z jednej strony próby wyodrębniania części zasobów i tworzenia tzw. szpitali jednoimiennych z zapewnieniem im odrębnego źródła i sposobu finansowania, należy uznać za słuszne, z drugiej brak jednoznacznego określonego centrum decyzyjnego oraz brak regulacji i wytycznych co do współpracy poszczególnych elementów systemu spowodował chaos organizacyjny, wyraźne odczuwalny przez pracowników systemu i pacjentów.

W konsekwencji braku określenie centrum decyzyjnego decyzje wydawali wszyscy, którym się wydawało, że mogą je podejmować. Dodatkowo zarządzający szpitalami byli absorbowani zadaniami informacji na różny temat i przez różne organy, dezorganizując organizacje udzielania świadczeń w nowych okolicznościach oraz poszukiwaniem źródeł zaopatrzenia w brakujące wyroby medyczne – przede wszystkim środki ochrony osobistej personelu, środki dezynfekcyjne i budowanie regulacji wewnętrznych dostosowujących działanie szpitala do zmienionej rzeczywistości.

Należy wspomnieć również, że nie było również ośrodka koordynującego dystrybucję środków ochrony osobistej. Nie zidentyfikowała takiej potrzeby i nie wzięła na siebie takiego zadania Agencja Rezerw Materiałowych, która nb. wykazała brak perspektywicznego myślenia wyprzedając część strategicznych zapasów okresie wzrastającego już zagrożenia i kompletnie nie radząc sobie z potrzebą szybkiego zbudowania zapasów. W efekcie środki ochrony osobistej zaczęły napływać w dużych, nawet przekraczających potrzeby ilościach, do szpitali jednoimiennych z różnych źródeł, pozostałe szpitale nie mogły się zaopatrzyć w nie wcale, albo musiały płacić spekulacyjne ceny. Konsekwencje zaburzenia tej dystrybucji podmioty lecznicze odczuwają po dziś dzień starając się zagospodarować nadmierne ilości sprzętu ze zbliżającymi się datami ważności.

Nie zostały użyte uprawnienia dające możliwości Ministrowi Zdrowia ustalenia , w drodze obwieszczenia maksymalnych cen zbytu dla:

- Leków
- Wyrobów medycznych
- Środków spożywczych specjalnego przeznaczenia żywieniowego
- Produktów biobójczych
- Surowców farmaceutycznych

Środki te mogły być wykorzystane w związku z przeciwdziałaniem COVID-19 lub w sytuacji zagrożenia braku dostępności na terytorium Rzeczypospolitej Polskiej w związku z COVID-19.

Nie zostały także użyte uprawnienia zapisane w art. 20 ustawy, zmieniającym ustawę prawo farmaceutyczne dające Ministrowi Zdrowia prawo nałożenia obowiązku przekazywania informacji do Zintegrowanego Systemu Monitorowania Obrotu Produktami Leczniczymi na hurtownie farmaceutyczne, a także na producentów i importerów wyrobów medycznych, raportowania w odniesieniu do wszystkich znajdujących się w obrocie produktów leczniczych, środków spożywczych specjalnego przeznaczenia żywieniowego oraz wyrobów medycznych. W opinii autora realizacja tych uprawnień ograniczyłaby patologiczną sytuację i spekulacje na rynku.

Należy zauważyć, że przekształcenie szpitali i realizację ww. obowiązków wprowadzono na podstawie poleceń wojewodów, z powołaniem art. 11. ust 1. ustawy z dnia 2 marca 2020 r. o szczególnych rozwiązaniach związanych z zapobieganiem, przeciwdziałaniem i zwalczaniem COVID-19, innych chorób zakaźnych oraz wywołanych nimi sytuacji kryzysowych, co nie jest właściwą podstawą prawną w świetle kompe-

tencji wojewodów (którzy wskazują podmioty np. szpitale, podmioty realizujące transport a także mogą wskazywać lekarzy). O ww. zmianach powinien zgodnie z ustawą specjalną decydować Minister Zdrowia (lub Główny Inspektor Sanitarny). W sytuacji zagrożenia epidemiologicznego powinien być zachowany schemat nadrzędności organów państwowych. Pomimo, iż Wojewoda jest przedstawicielem rządu w terenie, każda jego decyzja powinna mieć odzwierciedlenie w aktach normatywnych. Obecnie żaden z dotychczas obowiązujących oraz nowo wydanych aktów nie zawiera upoważnienia dla wojewody do wydania dyspozycji wstrzymania przyjęć planowych i zabiegów operacyjnych. Wojewoda nie może wchodzić w kompetencje Ministra Zdrowia i decydować o ograniczeniu udzielania świadczeń w przypadku braku aktu wyraźnie go upoważniającego.

Należy zwrócić uwagę, że wojewódzkie plany działania na wypadek epidemii nie były na bieżąco aktualizowane do obowiązującego stanu ustawy z dnia 5 grudnia 2008 r. o zapobieganiu oraz zwalczaniu zakażeń i chorób zakaźnych u ludzi i ustawy specjalnej z dnia 2 marca 2020 r. o szczególnych rozwiązaniach związanych z zapobieganiem, przeciwdziałaniem i zwalczaniem COVID-19, innych chorób zakaźnych oraz wywołanych nimi sytuacji kryzysowych. W planach nie został dopisany czynnik chorobotwórczy SARS-CoV2, nie zostały uwzględnione nowe obowiązki lekarzy kierujących i nowe algorytmy kierowania i powiadamiania o pacjentach podejrzanych o zakażenie, z zakażeniem, chorych. Wydaje się, że plany te mają ograniczoną przydatność, gdyż nie zawsze wskazują wystarczająco precyzyjnie zasoby służby zdrowia, które mogą być użyte. Nie wystarczy wskazać nazwy podmiotu (np. nazwy szpitala) i jego adresu należy wskazać konkretne komórki organizacyjne (lub ich część) z przypisanymi zasobami, a nade wszystko ustalić procedury współpracy.

2.4. Propozycje działań na przyszłość

1. Dbanie o wiarygodność, spójność, a także efektywność komunikacji społecznej na temat zdrowia, bez tego społeczeństwo nie będzie skłonne stosować się do wskazań.
2. Właściwe przygotowanie społeczne, organizacyjne i prawne do przyszłych epidemii i innych zagrożeń zdrowotnych.
3. Utworzenie jednego ośrodka monitorującego i koordynującego, który stale – bez względu na występujące epidemie czy zagrożenia- zajmie się analizami oraz koordynacją kluczowych obszarów ochrony zdrowia. Powinien być niezależny od NFZ.
4. Klarowny sposób finansowania utrzymywania stanu gotowości i prowadzonych działań, a także rekompensat za utracone możliwości realizacji kontraktów przez podmioty lecznicze.
5. Weryfikacja i aktualizacji planów zabezpieczenia i zarządzania kryzysowego w obszarze ochrony zdrowia, przygotowanych przez wojewodów. Opracowanie alternatywnych rozwiązań w zależności od m.in. rodzaju zagrożenia i jego zasięgu.

6. Zweryfikowanie listy dziedzin krytycznych dla zdrowia publicznego i opracowanie dla nich szczególnych rozwiązań (onkologia, kardiologia, pediatria, szczepienia, neurologia etc.)
7. Zrewidowanie regulacji dotyczących zapasów strategicznych, utrzymywania zapasów w podmiotach leczniczych, podmiotach gospodarczych, a także produkcji specjalnych i dystrybucji.
8. Szkolenia i praktyczne ćwiczenia dla zarządzających podmiotami leczniczymi i personelu medycznego, a także instytucji organizacji zaangażowanych w zwalczanie zagrożeń.
9. Zbudowanie systemu informacyjnego monitorującego krytyczne zasoby służby zdrowia.
10. Opracowanie procedur (algorytmów) postępowania z pacjentami z podejrzeniem poszczególnych stanów klinicznych.
11. Zharmonizowanie wewnętrznych procedur podmiotów leczniczych z procedurami publicznych instytucji i aparatu państwa.
12. Intensywne rozwijanie systemów informatycznych oraz zwiększanie ich stabilności (e-recepta, e-dokumentacja etc.)

3. NORMALNOŚĆ I ODPOWIEDZIALNOŚĆ - PRZEMYŚLENIA

Przechodząc do podsumowania i nawiązując do tytułu artykułu, zdefiniujmy kilka pojęć, czy też zachowań, co do których w konsekwencji opisywanych sytuacji w opinii autora należy wrócić i brać je pod uwagę jako te należne i oczekiwane w szczególności w sytuacjach wyjątkowych, m.in. zagrożeń zdrowotnych.

Normalność to w najkrótszej definicji, nieodbieganie od przyjętych norm. „Faktem jest, że ludzi zdrowych na umyśle praktycznie nie ma; na dziesiątki, a może nawet na setki tysięcy trafi się może jeden taki egzemplarz i to jeszcze daleko mu będzie do normalności" [4]. „Normalność jest linoskoczkiem nad otchłanią anormalności" [5].

Odpowiedzialność to obowiązek moralny lub prawny odpowiadania za swoje lub czyjeś czyny [6].

Dwoma podstawowymi kategoriami odpowiedzialności są:

- Odpowiedzialność moralna – jest każdym rodzajem przyjmowania na własne sumienie obowiązku opieki i odpowiadania za siebie, kogoś lub coś. W odróżnieniu od odpowiedzialności prawnej jest subiektywna i nie może być egzekwowana przez organy państwowe.
- Odpowiedzialność prawna – staje się stanem faktycznym w momencie popełnienia czynu zabronionego. Występuje pomiędzy obywatelem a Państwem. Jej dokładne regulacje spisane są w ustawach [7].

Kolejnym pojęciem, zachowaniem godnym przypomnienia w sytuacjach zagrożenia, ale oczywiście nie tylko jest spolegliwość.

Spolegliwość – pewność, możliwość polegania na kimś. Ktoś spolegliwy jest osobą, na której można polegać, na kim można się oprzeć. To ktoś troskliwy, opiekuńczy, godny zaufania.

Potocznie słowo to jest używane przede wszystkim w sensie uległości lub podporządkowywania się innym i to drugie znaczenie również ma aprobatę normatywną (na poziomie normy użytkowej).

Do filozofii pojęcie to zostało wprowadzone przez Tadeusza Kotarbińskiego w jego pracach na temat teorii skutecznego działania (prakseologia), zwłaszcza w pismach na temat etyki niezależnej. Termin pochodzi, według autora, od niem. zuverlässig i znany jest na Śląsku. Inne źródła wskazują na czeski przymiotnik spolehlivý, znaczący tyle, co godny zaufania.

Spolegliwy opiekun winien być życzliwie nastawiony wobec podopiecznych, wrażliwy na cudze potrzeby i skłonny do pomagania. Na podstawie tak skonstruowanego modelu dobrego człowieka Kotarbiński chciał udowodnić, że ten wzorzec nie spadł z zaświatów, ani nie jest jakimś echem niezmiennego ideału bytującego w rejonach czystych idei. Do przyzwoitego zachowania się nie jest więc potrzebna, według filozofa, wiara w ideał transcendentalny, ale zwykła wrażliwość, której kryteria nie zmieniają się w czasie. Kotarbiński bronił możliwości stworzenia etyki, która byłaby niezależna od poglądu filozoficznego lub religijnego i która mogłaby przetrwać nawet wtedy, gdy zniknie w nas przekonanie o słuszności jakiegokolwiek przekonania metafizycznego [8].

3. 1. Normalność – przemyślenia – rekomendacje – marzenia

Czas epidemii nauczył i nadal uczy Nas wszystkich zachowań, którego mogą być nowymi, ale mogą być tylko powrotem do czegoś co w przeszłości było już znane tylko zapomniane, albo też niestety czasami przez Nas odrzucone, czasami nieświadomie, ale też często z premedytacją.

Jednym z podstawowych elementów infrastruktury krytycznej jest człowiek i to on właśnie ma decydujący wpływ na jej jakość. Z kolei infrastruktura krytyczna paradoksalnie ze swej natury powinna służyć ludziom.

Kończąc to opracowanie pozostaje nam tylko nie zapomnieć jednego z polskich przysłów popularnych już w XVI wieku : Mikołaj Rej „Polak nie mądry, aż po szkodzie", J. Kochanowski w Pieśni o spustoszeniu Podola przez Tatarów: „Nową przypowieść Polak sobie kupi, że i przed szkodą i po szkodzie głupi"; jest ona przetworzoną, specjalną wersją przysłowia antycznego przytaczanego już przez Biernata z Lublina w Żywocie Ezopa Fryga, Mędrca Obyczajnego… Każdy mędrszy po szkodzie (łac. Post mala prudentior, gr. Meta ta deina fonimoteros).

LITERATURA

1. https://pl.wikipedia.org/wiki/Infrastruktura_krytyczna
2. Ustawa z dnia 26 kwietnia 2007 r. o zarządzaniu kryzysowym (Dz.U. z 2022 r. poz. 261).
3. https://sjp.pwn.pl/szukaj/zalecenie.html
4. Fiodor Dostojewski, Zbrodnia i kara
5. Witold Gombrowicz, Ferdydurke
6. https://sjp.pwn.pl/sjp/;2493511
7. https://mfiles.pl/pl/index.php/Odpowiedzialno%C5%9B%C4%87
8. https://pl.wikipedia.org/wiki/Spolegliwo%C5%9B%C4%87

NEW "NORMALITY" IN HEALTH - THE IMPACT OF THE SARS-COV2 OUTLOOK ON THE IMPLEMENTATION OF THE TREATMENT ENTITY CONTRACT IN THE ASPECT OF UNIVERSITY HOSPITAL MANAGEMENT

Abstract

Normality is, in the most general formulation, the statement of not deviating from the accepted norms. In the article, the author tries to carry out an assessment based on a retro-prospective analysis of decisions, behaviors, actions and the use of the opportunities available by law both by central units and the regional level during the SARS-CoV2 epidemic. . In the author's opinion, the above-mentioned activities had a direct impact on citizens' access to medical services, and people are the main recipients of the critical infrastructure, which, according to the definition, should serve them. Whether, and if so, what impact could the discussed activities have on the implementation of contracts for medical services?

Keywords: epidemic, sars-cov2

Hanna DZIDO*
Leszek CWOJDZIŃSKI**

ZAGROŻENIA HYBRYDOWE DLA INFRASTRUKTURY KRYTYCZNEJ PAŃSTW CZŁONKOWSKICH UNII EUROPEJSKIEJ

Celem niniejszego opracowania jest przedstawienie infrastruktury krytyczne jako (IK) zespołu elementów, podsystemów zdefiniowanych na poziomie dyrektywy Unii Europejskiej (UE) 2008/114/WE, która opisuje je jako „każdy system, który jest niezbędny do zapewnienia podstawowych funkcji gospodarczych i społecznych: zdrowia, żywności, bezpieczeństwa, transportu, energii, systemów informacyjnych, usług finansowych". Organy UE i państw członkowskich zwracają szczególną uwagę na ochronę i odporność infrastruktury krytycznej. Sytuacja geopolityczna państw UE wobec konfliktu rosyjsko – ukraińskiego zapoczątkowanego inwazją Rosji na Ukrainę 24 lutego 2022 roku, przeobraziła postrzeganie poczucia bezpieczeństwa obywateli państw UE. Bezpośredni konflikt zbrojny poparty różnorodnymi działaniami wspierającymi destabilizację spotęgował konieczność natychmiastowej weryfikacji i rewizji zagrożeń oraz konieczności opracowania działań i procesów mających na celu skuteczne zabezpieczenie i odparcie ewentualnych ataków na elementy infrastruktury krytycznej. Autorzy opierając się m.in. na dostępnych dokumentach i opracowaniach UE przedstawiają przegląd inicjatyw, takich jak szkolenie personelu, projektowanie bezpieczeństwa i inne kluczowe zmiany wynikające z doświadczeń poszczególnych państw, służb zajmujących się bezpieczeństwem oraz niezależnych ekspertów posiadających doświadczenie w międzynarodowym środowisku pracy nad bezpieczeństwem. Autorzy przedstawiają niezwykle istotną kwestią jaką jest skupienie się na konsekwencjach awarii infrastruktury, powszechnie uważanej za mającej poważny wpływ na dobrobyt społeczno-gospodarczy i bezpieczeństwo publiczne, w tym bezpieczeństwo narodowe. Zwracają uwagę na incydenty z użyciem UAVs, choć technicznie nie jest to jeszcze w tym przypadku rodzaj broni w rękach terrorystów, warto mieć na uwadze możliwości tych urządzeń jako elementów systemu dedykowanego destrukcji czy też sprowadzaniu bezpośredniego zagrożenia dla działania infrastruktury krytycznej. W opracowaniu zwrócono także uwagę na rolę społeczeństwa obywatelskiego w wykrywaniu i przeciwdziałaniu zagrożeniom IK. Infrastruktury krytyczne (IK) zapewniają obywatelom Unii Europejskiej (UE) istotne funkcje gospodarcze i społeczne. Sprzeciwiają się jednocześnie różnorodnym zagrożeniom, nie tylko naturalnym

* Uniwersytet Morski w Gdyni
** Airbus Poland S.A. Warszawa

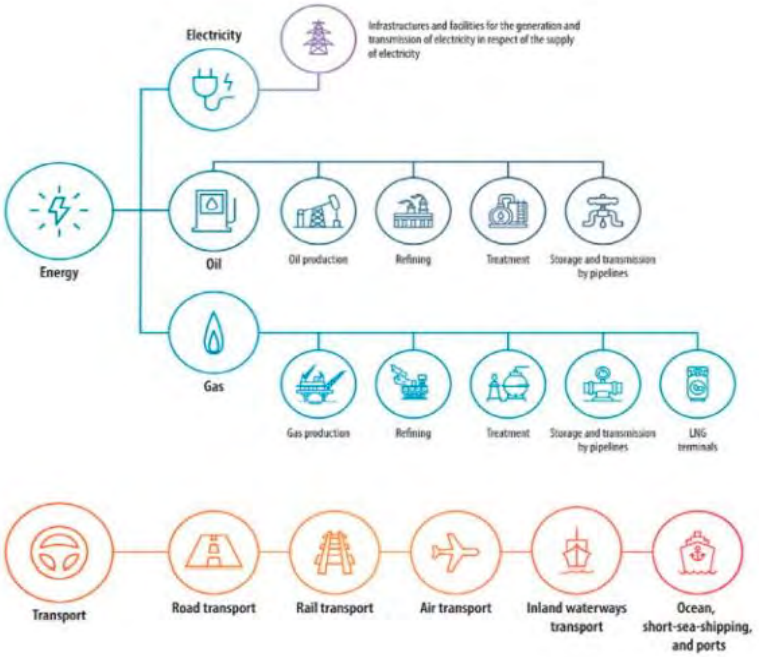
i przypadkowym, ale również intencjonalnym. Rosnąca zależność IK od postępu technologicznego dodaje kolejny element złożoności i podatności całej infrastruktury służącej działaniu podstawowych funkcji gospodarczych, społecznych, przemysłowych i obronnych.

Słowa kluczowe: infrastruktura krytyczna, odporność IK, bezpieczeństwo publiczne, zarządzanie kryzysowe, społeczeństwo obywatelskie, UAV

1. WPROWADZENIE

Infrastruktury krytyczne jako zespół elementów oraz podsystemów (IK) są zdefiniowane na poziomie Unii Europejskiej (UE) w dyrektywie 2008/114/WE, która opisuje je jako „każdy system, który jest niezbędny do zapewnienia podstawowych funkcji gospodarczych i społecznych: zdrowia, żywności, bezpieczeństwa, transportu, energii, systemów informacyjnych, usług finansowych". W związku z tym organy UE i państw członkowskich zwracają szczególną uwagę na ich ochronę i odporność. Termin „infrastruktura krytyczna" (IK) jest używany ogólnie w odniesieniu do infrastruktur krytycznych zlokalizowanych w państwach UE. Funkcjonujący w przestrzeni termin „infrastruktura strategiczna" IS, (ang. critical infrastructure CI) uznaje się za synonim IK. Termin „europejska infrastruktura krytyczna" (ECI) odnosi się do „infrastruktury krytycznej znajdującej się w państwach członkowskich, której zakłócenie lub zniszczenie miałoby znaczący wpływ na co najmniej dwa państwa członkowskie", zgodnie z definicją zawartą w art. 2 dyrektywy 2008/114/WE z dnia 8 grudnia 2008 r. w sprawie identyfikacji i wyznaczenia europejskiej infrastruktury krytycznej oraz oceny konieczności poprawy ich ochrony. Świadczone usługi IK, w połączeniu z ich transgranicznym charakterem i współzależnościami, sprawiają, że stają się one coraz bardziej

narażone na różnego rodzaju zagrożenia, nie tylko naturalne i przypadkowe, ale także celowe. Dotychczasowa ochrona infrastruktury krytycznej (IK) była regulowana Dyrektywą 2008/114/WE (Dyrektywa Rady 2008/114/WE z dnia 8 grudnia 2008 r. w sprawie rozpoznawania i wyznaczania europejskiej infrastruktury krytycznej oraz oceny potrzeb w zakresie poprawy jej ochrony (Dz. Urz. UE Nr L 345/75 z 23.12.2008 r.)), jednakże zakres stosowania oraz postrzeganie zagrożenia okazały się niewystarczające w obliczu zmieniającego się krajobrazu zagrożeń bezpieczeństwa. Krajobraz potencjalnych zagrożeń na terytorium UE zmienia się i ewoluuje wraz z postępem technologicznym i głębokimi wzajemnymi połączeniami, torując drogę do większej podatności na cyberataki.



Rys. 1. Infrastruktury krytyczne objęte dyrektywą UE
[Źródło: CriticalInfrastructuresstudy_EN.pdf]

2. RODZAJE ZAGROŻEŃ I POTENCJALNE ZAKŁÓCENIA W IK

Sytuacja geopolityczna państw UE wobec konfliktu rosyjsko – ukraińskiego zapoczątkowanego inwazją Rosji na Ukrainę 24 lutego 2022 roku, przeobraziła postrzeganie poczucia bezpieczeństwa obywateli państw UE. Bezpośredni konflikt zbrojny poparty różnorodnymi działaniami wspierającymi destabilizację ze strony Federacji Rosyjskiej, spotęgował konieczność natychmiastowej weryfikacji i rewizji zagrożeń oraz konieczności opracowania działań i procesów mających na celu skuteczne zabezpieczenie i odparcie ewentualnych ataków na elementy infrastruktury krytycznej.

W krajobrazie wyzwań dla IK zagrożenia hybrydowe stanowią obecnie źródła skompensowanych destrukcyjnych działań, których zasięg i konsekwencje są trudne do oszacowania. Akcje hybrydowe wykorzystują słabe punkty demokracji i instytucji, czerpiąc korzyści z niejednoznaczności w zakresie wykrywania i atrybucji oraz nieodłącznej trudności w sklasyfikowaniu zdarzenia hybrydowego ze względu na zastosowanie różnych środków – konwencjonalnych i niekonwencjonalnych w różnych obszarach: politycznym, ekonomicznym, cybernetycznym, wojskowym, cywilnym przez atakującego. Stanowią one skuteczny atut w rękach zarówno państwowych, jak

i niepaństwowych podmiotów, które dążą do wykorzystania słabych punktów państw członkowskich UE oraz pozostałych państw pozostających w relacjach politycznych, gospodarczych, społecznych. Przykładami strategii hybrydowej są kampanie dezinformacyjne, ingerencja w procesy demokratyczne i wyborcze czy systemy edukacyjne państw członkowskich.

Rosnąca cyfryzacja usług, w coraz większym stopniu uzależniona od Internetu, wiąże się z dużymi wyzwaniami związanymi z zagrożeniami cyberbezpieczeństwa. Zwiększone uzależnienie od systemów cyfrowych wprowadza nowy stopień elastyczności, który może zostać wykorzystany przez złośliwe podmioty do działalności przestępczej, a nawet terrorystycznej. Na przykład fakt, że większość infrastruktur korzysta z podobnych, dostępnych w handlu systemów typu „off-the-shelf" takich jak Windows, znacznie ułatwia potencjalnym cyberprzestępcom zaatakowanie ich ponieważ atakujący są już zaznajomieni z funkcjonowaniem serwera. Zwiększona cyfryzacja charakteryzuje IK o wyższym stopniu łączności, co w konsekwencji usuwa szereg przeszkód dla osób próbujących włamać się do systemu. Zagrożenia w cybersferze ulegają zmianom, stopniowo odchodząc od działań przestępczych prowadzonych głównie przez hakerów „rekreacyjnych" lub aktorów kierowanych pobudkami finansowymi, w kierunku działań wywiadowczych i destrukcyjnych podejrzewanych o prowadzenie przez podmioty państwowe lub organizacje przestępcze. Ponadto postępy w zakresie Internetu rzeczy (IoT) zwiększyły ryzyko incydentów związanych z bezpieczeństwem informacji, które pociągają za sobą poważne konsekwencje dla IK w całej Europie, począwszy od zakładów przemysłowych, przez instytucje ochrony środowiska, po infrastrukturę transportową (NEC Corporation, 2016b; Torch Marketing i KNM Media, 2016). Atak złośliwego oprogramowania może potencjalnie spowodować zamknięcie całej usługi, powodując poważne zakłócenia w społeczeństwie. Niektóre rodzaje złośliwego oprogramowania mogą wpływać na technologie leżące u podstaw funkcjonowania IK dowolnego zaawansowanego społeczeństwa, takie jak struktury kontroli nadzorczej i pozyskiwania danych (SCADA) oraz systemy interfejsu człowiek-maszyna (HMI). Cyberatak na Ukrainę w 2015 r. stanowi odpowiedni przykład, w którym złośliwe oprogramowanie zainfekowało infrastrukturę elektryczną kraju, atakując system SCADA, powodując przerwy w dostawie prądu w Kijowie i innych zachodnich regionach kraju. Ten przypadek pokazał również, w jaki sposób incydenty mające miejsce w krajach sąsiadujących z UE mogą ewentualnie mieć wpływ na państwa członkowskie UE ze względu na współzależności transgraniczne (Parlament Europejski, 2021).

Rodzaje zagrożeń i potencjalne zakłócenia przez nie powodowane w IK mogą się różnić w zależności od sektorów i ewoluować wraz z szybko postępującą technologią. Co więcej, stają się bardzo zależne od siebie, z uwagi na coraz większy stopień wzajemnych połączeń urządzeń w sieciach połączonych. Współzależność stała się główną cechą funkcjonowania krytycznych podmiotów i aspektem, który wymaga należytej analizy, zwłaszcza biorąc pod uwagę przyjęcie dalszych lub zmienionych środków ochrony kluczowych podmiotów (elementów) IK. Ze względu na wysoki poziom wza-

jemnych połączeń, wszelkie przerwy w świadczeniu usług IK mogą generować natychmiastowe skutki, co z kolei prowadzi do zakłócenia funkcjonalności innych współzależnych infrastruktur. Przykład takiego zjawiska, określany mianem „awarii kaskadowej", oznacza np. załamanie produkcji lub dystrybucji energii w kraju. Może to szybko wpłynąć na transport kolejowy, funkcjonowanie metra, ograniczoną możliwość zapewnienia dostaw energii do np. urzędów i instytucji, obiektów administracji, gospodarstw domowych, zagrozić służbom ratunkowym i utrudnić telekomunikacji, a nawet spowodować awarię w systemach sterowania i pompowania wody pitnej.

Dostawcy energii, tacy jak firmy energetyczne i gazowe, stoją przed tymi samymi typowymi zagrożeniami, które nękają inne branże. Unikalne współzależności między systemami wirtualnymi a infrastrukturą fizyczną w branży zaopatrzenia w energię stwarzają wysokie ryzyko. Dlatego ochrona komunikacji wewnętrznej pomiędzy urządzeniami sieci smart grid jest niezwykle ważna. Negatywne konsekwencje mogą obejmować: utratę mocy; przeciążenia mocy; niszczenie sprzętu; i uszkodzenia urządzeń w całej sieci. Niszczycielskie efekty kaskadowe mogą następnie doprowadzić do awarii samej sieci energetycznej w więcej niż jednym kraju. Cyberprzestępcy mogą wpływać na elektrownie na różne sposoby, na przykład powodując spustoszenie w całym systemie, powodując niebezpieczną nadwyżkę mocy (potencjalnie uszkadzając sprzęt) lub przerwy w dostawie prądu. Ataki poprzez infekcję złośliwym oprogramowaniem mogą spowodować utratę komunikacji i kontroli nad siecią, co prowadzi do zatrzymania produkcji energii. Ataki i rozproszone ataki mogą opóźniać, blokować lub uszkadzać informacje, powodując niedostępność zasilania lub wymiany informacji w inteligentnej sieci. Cyberataki mogą wpływać na transmisję energii, zdalnie odłączając usługi. Może to prowadzić do zakłóceń zasilania w mieście lub regionie, w tym do potencjalnego długoterminowego uszkodzenia sprzętu, emisji palnego gazu lub naruszenia danych czujnika, firmy, a nawet klienta. Przykład takiego ataku na sektor energetyczny (sieć elektryczna) miał miejsce w 2015 roku na Ukrainie. Atak spowodował poważne zakłócenia w świadczeniu usług i przerwy w dostawie prądu, który dotknął 27 podstacji i około 225 000 użytkowników końcowych. Była to część większego ataku, którego celem było zdestabilizowanie ukraińskiego rządu", atakując elektrownie, kopalnię i infrastrukturę kolejową. Celem było sparaliżowanie opinii publicznej i krytycznej infrastruktury poprzez wyłączenie przemysłowych systemów sterowania (ICS).

Rosnąca cyfryzacja usług, w coraz większym stopniu uzależniona od Internetu, wiąże się z dużymi wyzwaniami związanymi z zagrożeniami cyberbezpieczeństwa. Takie połączone systemy stały się punktami aktywnymi prób naruszenia bezpieczeństwa, na przykład w sektorze transportowym. W tym przypadku rosnące uzależnienie od korzystania z systemów ICT doprowadziło do powstania usług „Inteligentnego Transportu Publicznego" (IPT), które z pewnością oferują większą wydajność i usprawnione operacje, ale są również narażone na liczne podatności, w tym zagrożenia cybernetyczne. Zasoby IPT są bardziej złożone niż tradycyjne systemy transportowe, ponieważ łączą w sobie zarówno komponenty fizyczne, jak i cybernetyczne. Autobus czy wagon metra nie jest już zwykłym pojazdem transportu publicznego, ale

jest także systemem gromadzenia i rejestrowania danych, środkiem do rozpowszechniania informacji, mobilnym węzłem Wi-Fi i źródłem informacji wywiadowczych w czasie rzeczywistym. Ponadto IPT charakteryzuje się silnym połączeniem między różnymi komponentami, dzięki czemu awaria jednego może zostać przeniesiona na kolejne komponenty. W tym kontekście aktywa IPT podlegają większej liczbie zagrożeń bezpieczeństwa, zarówno fizycznych, jak i cybernetycznych, które mogą wpływać na systemy teleinformatyczne i procesy wymiany danych. Transformacja cyfrowa i związane z nią zagrożenia cybernetyczne mogą dotyczyć wszystkich rodzajów systemów transportowych, w tym sieci kolejowych, lotniczych i morskich. Potencjalne zakłócenia spowodowane cyberatakiem na społeczeństwo transport może przybierać różne formy. Cyberataki mogą atakować systemy bezpieczeństwa transportu i osłabiać alarmy, potencjalnie poważnie utrudniając szybkie reakcje karetek pogotowia i podobnych służb w sytuacjach awaryjnych.

Przemysł lotniczy również staje się coraz bardziej uzależniony od połączonych sieci i komputerów. Incydenty związane z bezpieczeństwem informacji nasilają się, w tym cyberataki i zakłócenia zależności ICT. Konsekwencje cyberataków na lotniskach mogą obejmować awarie sieci, zakłócenia kontroli bezpieczeństwa, opóźnienia pasażerów i odwołane loty, co prowadzi do utraty zaufania, utraty reputacji i ostatecznie do strat finansowych. W scenariuszu z potencjalnym zagrożeniem cyberprzestępca uzyskuje uprzywilejowany poziom dostępu i/lub przechowuje dane uwierzytelniające użytkownika w celu zakłócenia usług odprawy. Gdy system odprawy zostanie naruszony, przestępca może zaatakować połączone systemy i bazy danych (awaria kaskadowa), powodując: przerwy lub nawet przerwy w działaniu całego systemu lotniczego; zagadnienia w procedurach wysiadania i załadunku; poważne zakłócenia operacji lotniczych; oraz większy potencjał aktów terrorystycznych (np. ładowanie materiałów wybuchowych lub nielegalnych produktów do bagażu).

Porty morskie są również infrastrukturą krytyczną, szczególnie podatną na ataki cybernetyczne, które mogą zakłócać działalność związaną z transportem ładunków morskich, pasażerów i pojazdów lub rybołówstwem. Propagacja okupów może doprowadzić do całkowitego zamknięcia operacji portowych. Biorąc pod uwagę przykład Kanału Sueskiego, należy zwrócić uwagę na zagrożenia, jakie stwarzają wrogie podmioty – zarówno państwowe, jak i niepaństwowe – które mogą mieć zamiar zaszkodzić jego infrastrukturze. Takie zagrożenia obejmują potencjalne cyberataki, co jest szczególnie niepokojącym problemem, biorąc pod uwagę lukę w strukturze ICT Suezu (Coates i Greenway, 2021). Taka perspektywa jest realną możliwością, która dramatycznie zagroziłaby handlowi morskiemu oraz ochronie podmorskich kabli komunikacyjnych.

Patrząc na infrastrukturę i usługi morskie, kable podmorskie zasługują na szczególną uwagę, nie tylko ze względu na znaczące chińskie inwestycje w tej dziedzinie. Budowa lub zakup kabli światłowodowych jest częścią szerszej strategii Pekinu, aby stać się liderem w dostarczaniu infrastruktury cyfrowej i łączności na całym świecie – tzw. Cyfrowego Jedwabnego Szlaku (Rada Stosunków Międzynarodowych, 2020).

Celem Chin jest rozszerzenie wykorzystania własnych technologii i standardów, a tym samym zwiększenie interoperacyjności z krajami zamorskimi, zwłaszcza w powstających ekosystemach cyfrowych, w celu tworzenia zależności (Arcesati, 2021). Kraj chce rozszerzyć swoje wpływy na sieci światłowodowych kabli podmorskich – zarówno kupując je, jak i budując – na Bałtyku, Morzu Śródziemnym i Arktyce (Arcesati, 2021). Jest to aspekt, który UE powinna ściślej monitorować, ponieważ chińskie siły wojskowe aktywnie pracują nad zdolnościami podmorskiego nadzoru i monitorowania, wykorzystując integrację cywilno-wojskową w tej dziedzinie (Arcesati, 2021).

Zjawiska „awarii kaskadowej" niosą za sobą niebezpieczeństwo, rozszerzenia awarii jednej (pojedynczej) części danej infrastruktury do załamania się innych elementów i ostatecznie do poważnych uszkodzeń w całej sieci. Powaga tych zagrożeń wynika również z faktu uzależnienia państwowych gospodarek od współpracy gospodarczej z innymi państwami. Jednym z wiodących przykładów mniej oczywistej formy ingerencji ze strony podmiotów państwowych i niepaństwowych są bezpośrednie inwestycje zagraniczne (BIZ) w państwach członkowskich UE przez kraje trzecie, takie jak Chiny i Rosja. Inwestycje te skierowane są zarówno na standardowe towary i produkty komercyjne, jak i strategiczne aktywa, usługi lub podmioty, w tym infrastrukturę krytyczną (IK). Elementarną kwestią jest bezpieczeństwo dostaw i utrzymania kontroli przez państwa nad swoimi systemami bezpieczeństwa i infrastrukturą krytyczną. Najnowsze doświadczenia pokazują, że zarówno konflikty zbrojne jak i ograniczenia wywołane epidemią SARS-COV-2 bardzo poważnie mogą zagrozić stabilności państwowej infrastruktury krytycznej. IK są podatne na zróżnicowane rodzaje zagrożeń, nie tylko naturalnych i przypadkowych, ale także intencjonalnych. Rosnąca zależność IK od postępu technologicznego dodaje kolejny element złożoności i podatności. W szczególności cybersfera jest narażona na zagrożenia, których destrukcyjne konsekwencje są mnożone przez rosnącą współzależność i połączenie IK oraz zacieranie się granic między światem fizycznym i internetowym. Sytuacje nadzwyczajne w świecie rzeczywistym, takie jak pandemia COVID19, stanowią bardzo podatna przestrzeń do wykorzystania przez złośliwe podmioty działające w wymiarze internetowym. Jednym ze znaczących przykładów na poziomie globalnym jest to, że Światowa Organizacja Zdrowia (WHO) odnotowała pięciokrotny wzrost liczby cyberataków od wybuchu pandemii w porównaniu z tym samym okresem w roku poprzedzającym pandemię (WHO, 2020). Ponadto transgraniczny charakter i współzależności nie tylko między wieloma IK, ale także powiązanie IK z innymi usługami i obiektami sprawiają, że są one szczególnie atrakcyjnymi celami celowego zakłócania przez obce państwa i podmioty niepaństwowe. Niedobory lub braki dostaw surowców, podzespołów, elementów wyposażenia systemów IK czy też zaburzenia w ciągłości dostaw przy jednoczesnym ograniczaniu mobilności oraz wysokim poziomie uzależnienia od Internetu, wskazują na braki w niezależności i problemach w zapewnieniu sprawnego funkcjonowania administracji i gospodarki w poszczególnych państw członkowskich, w obliczu niespodziewanych i długotrwałych sytuacji zagrożenia.

Innym aspektem wykraczającym poza BIZ, ale w równym stopniu związanym z odpornością IK, jest rosnąca zależność UE jako wspólnoty państw od zagranicznych dostawców technologii. UE doświadcza stosunkowo dużej zależności od importu wielu produktów i aktywów podstawowych, ponieważ dziesięciolecia dezindustrializacji doprowadziły do niedoborów w produkcji i kwalifikacjach w kluczowych sektorach. Zaniepokojenie rośnie również w stosunku do innych form ingerencji w infrastrukturę edukacyjną i religijną. Tak jest na przykład w przypadku instytucji edukacyjnych typu non-profit finansowanych przez rządy poszczególnych państw trzecich w celu promowania ich języka i kultury. Mniejszości narodowe przypływające na tereny państw członkowskich o odmiennej kulturze, religii, obyczajach i zasadach funkcjonowania życia społecznego stanowią potencjalne zagrożenie w procesie asymilacji. Konieczność współfunkcjonowania w jednej przestrzeni społeczno – gospodarczo – politycznej nastręcza wiele problemów. Możliwości i zakres wsparcia dla mniejszości narodowych w dostępie do rynku pracy, życia kulturalnego i swobodnej egzystencji, w wielu przypadkach uznawana jest za niewystarczające. Problem odizolowania generuje kolejne zagrożenia. Wioski i obozy dla uchodźców mogą stać się epicentrum zagrożenia dla lokalnej ludności (rozboje, kradzieże, rozruchy).

Istnieją różne podejścia do poprawy bezpieczeństwa IK, obejmujące nie tylko procedury i operacje, lecz także sposób i procesy projektowania samych IK. Nieodzownym w całym zagadnieniu jest przedstawienie przeglądu inicjatyw, takich jak szkolenie personelu, projektowanie bezpieczeństwa i inne kluczowe zmiany wynikające z doświadczeń poszczególnych państw, służb zajmujących się bezpieczeństwem oraz niezależnych ekspertów posiadających doświadczenie w międzynarodowym środowisku pracy nad bezpieczeństwem. Niezbędne jest zastosowanie scenariuszy zagrożeń dla IK oraz wyszczególnienie słabości (słabych punktów) zarówno IK jako całości ale również systemów i poszczególnych elementów IK powiązanych z rosnącą współzależnością i połączeniem IK pomiędzy sobą oraz Internetowi i rozwiązaniom wykorzystującym sztuczną inteligencję (AI).

Wśród dodatkowych sektorów interwencji, które zasługują na uwagę i staranne rozważenie, są: przemysł chemiczny; nowe i przełomowe technologie; edukacja; a także systemy komunikacji, w tym usługi masowe, media społecznościowe i informacyjne. Inne obszary szczególnie ważne do monitorowania obejmują społeczeństwo obywatelskie wraz z procesami i instytucjami demokratycznymi. Przemysł chemiczny jest szczególnie narażony na zagrożenia bezpieczeństwa, zarówno fizyczne, jak i cybernetyczne, złośliwe i przypadkowe. Prekursory chemiczne mogą zostać skradzione i/lub przemycone przez terrorystów lub przestępców, których celem są szlaki dostaw lub dawne laboratoria, ale także mogą zostać nabyte na czarnym rynku lub nawet od legalnych dostawców. Liczne przykłady wskazują na zagrożenia chemików zaangażowanych w tego rodzaju celowe działania, od Czeczenii po Rosję, Irak czy Afganistan. W Europie niezamierzone działania, takie jak awarie przemysłowe prowadzące do poważnych katastrof ludzkich i środowiskowych, są nadal stosunkowo częste, od katastrofy przemysłowej w Seveso (Włochy) w 1976 r. po wybuchy (z azotanem amonu) w 2012 i 2014 r. w Tuluzie (Francja).) i Gorni Lom (Bułgaria). Każdego roku

w UE dochodzi do około 30 poważnych awarii przemysłowych (Komisja Europejska, 2017a). Poza terytorium UE do ogromnych katastrof należy eksplozja w porcie w Bejrucie w sierpniu 2020 r., która była odczuwalna tak daleko, jak na Cyprze (Ramzy, 2020). Dyrektywy Seveso (82/501/EWG, dyrektywa Seveso II 96/82/WE, dyrektywa Seveso III 2012/18/UE) regulują sektor przemysłu chemicznego UE i są zintegrowane z innymi politykami UE, w tym CIP. Chociaż obecne przepisy są uważane za odpowiednie, proces ciągłego dostosowywania stanowi podstawę udanego podejścia. Wynika to głównie z intensywnej i szybkiej industrializacji w ostatnich dziesięcioleciach w stosunkowo „nowszych" państwach członkowskich UE oraz w krajach sąsiadujących z UE, takich jak Bałkany Zachodnie czy Europa Wschodnia, chociaż wypadki przemysłowe zdarzają się również w „starszych" państwach członkowskich, takich jak Francja. Szczególną uwagę należy zwrócić na ryzyko transgraniczne związane z zakładami chemicznymi utworzonymi na skrzyżowaniach terytorium UE i spoza UE, nie tylko ze względu na różnice w przepisach i mechanizmach zarządzania kryzysowego. Zależność od powstających i zakłócających technologii (EDT), określonych technologii lub surowców spoza terytorium UE może wiązać się z poważnymi zobowiązaniami w łańcuchach dostaw produktów lub usług szczególnie ważnych w życiu codziennym. Podobnie ukierunkowane inwestycje zagranicznych interesariuszy w te Podobnie ukierunkowane inwestycje zagranicznych zainteresowanych stron w te technologie lub materiały w UE i jej sąsiedztwie zasługują na uwagę ze względu na ich potencjał ingerencji w Europę, czyniąc ją bardziej podatną na zagrożenia i uzależnioną. Jako takie powinny być brane pod uwagę dla większej ochrony systemowej i budowania odporności. Inny rodzaj ingerencji jest wymierzony w słabe punkty w strukturach społecznych typowych dla społeczeństw zachodnich, w tym państw członkowskich UE. Chociaż nie są uważane za IK lub usługi o krytycznym znaczeniu jako takie, stanowią one ważne elementy wspierające prawidłowe funkcjonowanie europejskiego społeczeństwa obywatelskiego, przyczyniając się do jego stabilności, i stały się celem strategii hybrydowych zagranicznych interesariuszy. Te struktury społeczne obejmują ekosystemy informacyjne (masy, media społecznościowe i usługi informacyjne) oraz proces i instytucje demokratyczne (polityczne i wyborcze). Na przykład strategia hybrydowa skierowana do państw członkowskich poprzez kampanie dezinformacyjne może wywołać niekontrolowane, irracjonalne reakcje ze strony społeczeństwa obywatelskiego, prowadzące do nieprzewidywalnych konsekwencji i potencjalnie wpływające na łańcuchy dostaw lub funkcjonowanie tych IK, które są również przestrzenią publiczną/miękkimi celami. Ingerencje w systemy edukacji w państwach członkowskich np. dostosowywanie programów nauczania oraz systemów zdawania egzaminów w polskim systemie edukacji dla uchodźców z Ukrainy, również powinny być monitorowane, ponieważ w przyszłości mogą pojawić się nowe zjawiska. Sektory te nie stanowią wyczerpującej listy, lecz służą jako wybrane przykłady obszarów, które mogłyby skorzystać na zwiększonej uwadze i monitorowaniu.

Przyglądając się bliżej procesom demokratycznym w państwach członkowskich oraz postępującej migracji obywateli nie tylko państw członkowskich ale również

uchodźców z państw trzecich (np. obywateli Ukrainy), wydaje się, że zagraża im szereg złośliwych działań. Wśród nich systemy demokratyczne UE wydają się szczególnie wrażliwe w odniesieniu do: uczciwości wyborów i reklamy politycznej; rozpowszechnianie dezinformacji; ingerencji w wolność mediów i pluralizm mediów. Ingerencja w procesy wyborcze może odbywać się poprzez cyberataki w celu wtrącania się i fałszowania wyników wyborów. Wykorzystanie głosowania elektronicznego lub transmisji wyników online, przy jednoczesnym ułatwieniu procedur wyborczych, stwarza nowe podatności na Cyberataki (Fundacja Roberta Schumana, 2020). Procesy wyborcze w coraz większym stopniu opierają się na Internecie, także w odniesieniu do kampanii online, co umożliwiło kandydatom poszerzenie grupy docelowej poprzez zwiększenie i zróżnicowanie ich kanały komunikacji. Jednocześnie sprawia to, że procesy demokratyczne stają się bardziej podatne na zagrożenia, narażając je na niebezpieczeństwo dezinformacji. Takie działania mają na celu wypaczanie lub rozpowszechnianie fałszywych informacji o kandydatach, partiach politycznych, a nawet instytucjach państwowych i szerzej działaniach rządów.

Niezwykle istotną kwestią jest skupienie się na konsekwencjach awarii infrastruktury, powszechnie uważanej za mającej poważny wpływ na dobrobyt społeczno-gospodarczy i bezpieczeństwo publiczne, w tym bezpieczeństwo narodowe (OECD, 2008). Możliwe zakłócenia w funkcjonowaniu mogą stanowić okazję do poważnych naruszeń bezpieczeństwa, przez co wymagają starannego rozważenia. Przestrzenie publiczne o wewnętrznych słabościach wynikających z ich otwartego charakteru, publicznego charakteru i łatwego dostępu (na przykład z powodu braku kontroli bezpieczeństwa w punktach wejścia) określane są jako tzw. „miękkie cele" infrastruktur krytycznych (Komisja Europejska, 2017b). Ponadto, ponieważ często charakteryzują się dużą koncentracją ludzi, stały się atrakcyjne dla terrorystów, którzy w swoich działaniach dążą do maksymalizacji liczby ofiar. Ataki w Brukseli w 2016 r., Barcelonie w 2017 r. i Strasburgu w 2020 r., które uderzyły w jarmarki bożonarodzeniowe i strefy dla pieszych, potwierdzają takie trendy w atakach terrorystycznych, gdzie głównymi celami nie są już obiekty instytucjonalne lub religijne, ale częściej otwarte przestrzenie publiczne. Transport kolejowy i metro, lotniczy czy morski są również przykładami miękkich celów. Kwestie zabezpieczenia i ochrony tego rodzaju elementów infrastruktury wymagają kompleksowego podejścia. Same systemy monitorowania i zabezpieczenia systemowe okazały się niewystarczające Niezbędny jest proces edukacji społecznej, który wzmagał będzie odporność miękkich celów infrastruktury. Jeżeli społeczeństwo obywatelskie otrzyma odpowiednią edukację i wytyczne dotyczące zagrożeń, zapobiegania im oraz działań, które można podjąć, może stać się cennym zasobem, a nie tylko celem, poprzez identyfikowanie i zgłaszanie podejrzanych działań mających miejsce w przestrzeni publicznej. Wykorzystanie tych czynników wymaga aktywnego zaangażowania obywateli, którzy są głównymi użytkownikami celów miękkich, zgodnie z koncepcją „obywatela strategicznego" (Falk, 2020). Ostatnie trendy w terroryzmie i pojawienie się zagrożeń hybrydowych (doświadczonych w znacznym stopniu podczas pandemii COVID-19) pokazują, w jaki sposób różne aspekty społeczeństwa obywatelskiego i jego funkcjonowanie są wykorzystywane

przez złośliwe podmioty państwowe i niepaństwowe. W świetle korzyści, jakie daje atakującemu atakowanie społeczeństwa obywatelskiego, przyszłe zagrożenia będą coraz częściej wykorzystywać wszystkie te aspekty, które zakłócają jego prawidłowe działanie, od łańcuchów dostaw po ingerencję w usługi krytyczne/podstawowe, aż po celowe prowokowanie ofiar lub fizyczne i psychologiczne urazy ludzi. Wzmocnienie pozycji ludności i promowanie kultury bezpieczeństwa i bezpieczeństwa wśród obywateli to kluczowe elementy, które należy bardziej uwzględnić w zarządzaniu kryzysowym na szczeblu lokalnym, krajowym i unijnym. Innym elementem istotnym dla tych IK, które są miękkimi celami, jest zastosowanie podejścia „zabezpieczenia już na etapie projektowania", zapewniającego, że przestrzeń jest zaprojektowana i zorganizowana w taki sposób, aby uwzględniała potencjalną złośliwą, terrorystyczną lub niezamierzoną działalność i ich konsekwencje dla ludzkich zachowań poprzez przewidzenie schronów architektonicznych i zaplanowanie odpowiednich dróg ewakuacyjnych. Cele miękkie charakteryzujące się intensywnym przepływem ludzi (na przykład stacja metra w godzinach szczytu) muszą uwzględniać analizę zachowań tłumu. W wielu przypadkach nie jest potrzebna żadna broń, aby sprowokować ofiary i obrażenia, które pojawiają się po prostu z powodu reakcji tłumu.

3. PODSUMOWANIE

Przy ocenie zagrożeń terrorystycznych wobec IK należy wziąć także pod uwagę drony. Ich potencjalne zatrudnienie do prowadzenia brutalnych działań obejmuje drony z ładunkiem wybuchowym uderzające w obiekt po drony przelatujące nad bezpieczną konstrukcją i zbierające wrażliwe dane (Pompers i Tarini, 2017). Na przykład IS dokonało pierwszego ataku z użyciem drona załadowanego materiałem wybuchowym w Syrii na jednostki wojskowe w ramach operacji Tarcza Eufratu w 2016 roku, powodując trzy obrażenia. Od tego czasu ataki dronów dokonywane przez podmioty niepaństwowe stały się bardziej powszechne (Balkan, 2016). Choć technicznie nie jest to rodzaj broni, warto mieć na uwadze możliwości tych urządzeń jako elementów systemu dedykowanego destrukcji czy sprowadzaniu bezpośredniego zagrożenia dla działania infrastruktury krytycznej.

HYBRID THREATS TO CRITICAL INFRASTRUCTURES OF MEMBER STATES OF THE EUROPEAN UNION

Abstract

The aim of this study is to present critical infrastructure as (CI) a set of elements, subsystems defined at the level of European Union Directive (EU) 2008/114 / EC, which describes them as "any system that is necessary to ensure basic economic and social functions: health , food, security, transport, energy, information systems, financial services ". EU and Member State authorities pay particular attention to the protection and resilience of critical infrastructures. The geopolitical situation of EU countries in the face of the Russian-Ukrainian conflict initiated by Russia's invasion of Ukraine on February 24, 2022, changed the perception of the sense of security of EU citizens. Direct armed conflict, supported by various actions supporting destabilization, intensified the necessity of immediate verification and revision of threats and the necessity to develop actions and processes aimed at effective protection and repulsion of possible attacks on elements of critical infrastructure. The authors, relying, inter alia, on provide an overview of initiatives such as staff training, security design and other key developments based on national experiences, security services and independent experts with experience in the international security work environment on available EU documents and studies. The authors present an extremely important issue, which is to focus on the consequences of infrastructure failure, widely regarded as having a serious impact on socio-economic welfare and public safety, including national security. They pay attention to incidents with the use of UAVs, although technically this is not yet a type of weapon in the hands of terrorists, it is worth considering the capabilities of these devices as elements of a system dedicated to destruction or bringing a direct threat to the operation of critical infrastructure. The study also highlights the role of civil society in detecting and counteracting CI threats. Critical infrastructures (CI) provide citizens of the European Union (EU) with important economic and social functions. At the same time, they oppose various threats, not only natural and accidental, but also intentional. The growing dependence of CI on technological progress adds another element of the complexity and vulnerability of the entire infrastructure serving the operation of basic economic, social, industrial and defense functions.

Keywords: critical infrastructure, CI resilience, public safety, crisis management, civil society, UAV.

Tomasz EWERTOWSKI*
Barbara KRAJEWSKA*
Michalina ZEMBIK*
Magdalena KARPA*

BADANIE PRZYDATNOŚCI WYKORZYSTANIA NOWOCZESNYCH TECHNOLOGII GIS W SYTUACJACH KRYZYSOWYCH DLA WYBRANYCH DYSCYPLIN ZARZĄDZANIA I STANÓW NADZWYCZAJNYCH

Celem niniejszego opracowania jest zbadanie przydatności wykorzystania nowoczesnych technologii GIS w sytuacji kryzysowej dla wybranych dyscyplin zarządzania oraz stanów nadzwyczajnych. Autorzy, opierając się m.in. na taksonomii stanów bezpieczeństwa narodowego oraz koncepcji integracji korporacyjnych systemów zarządzania przywracających zdolności operacyjne organizacji po zakłóceniach, przedstawiają wyniki badań przydatności. Badania empiryczne przeprowadzono na grupie studentów Politechniki Poznańskiej. Metodyka badania opiera się na kwestionariuszu ankietowym. Korzystając z wyników ankiety, stwierdzono że aplikacje GIS są bardzo przydatna dla wybranych dyscyplin zarządzania, sytuacji awaryjnych oraz stanów nadzwyczajnych. Jednakże istnieją różnice w postrzeganiu tej przydatności przez respondentów i w związku z tym została przedstawiona hierarchizacja przydatności. Główne wnioski z badania pokazują, że wykorzystania nowoczesnych technologii GIS w sytuacji kryzysowej poprawia jakość zarządzania oraz pozwala na powszechną dostępność do informacji przestrzennej w sytuacji kryzysowej.

Słowa kluczowe: Zarządzanie kryzysowe, systemy informacji przestrzennej, odporność organizacyjna, zarządzanie ciągłością działania

* Instytut Inżynierii Bezpieczeństwa i Jakości, Wydział Inżynierii Zarządzania, Politechnika Poznańska.

1. WPROWADZENIE

Wybuch wojny na Ukrainie, a wcześniej pandemii COVID-19 ujawnił podatność organizacji na sytuacje kryzysowe i kryzysy. Organizacja traktowana jest jako złożony system składający się z ludzi, struktury, zadań i technologii (Diament Leavitta). Sytuacja kryzysowa obejmuje okres czasu, charakteryzujący się różnym natężeniem oddziaływania czynników ryzyka i pojawia się zwykle jeszcze w okresie bezpiecznego funkcjonowania organizacji, a kończy w okresie ostrego kryzysu, kiedy w związku z potrzebą przetrwania organizacji, w wymiarze bezpieczeństwa narodowego, konieczne wprowadzenie jest stanów nadzwyczajnych [Nowak 2007]. Kryzys definiowany jest jako niestabilny stan obejmujący zbliżającą się nagłą lub istotną zmianę, która wymaga pilnej uwagi i działań w celu ochrony życia, majątku, mienia lub środowiska [ISO 22300:2018]. Podział sytuacji kryzysowych zobrazowano na rys. 1.

Rys. 1. Usytuowanie sytuacji kryzysowych w stanach bezpieczeństwa narodowego.
Źródło: opracowanie własne na podstawie [Nowak 2007].

Sytuacje kryzysowe wywołane są czynnikami ludzkimi, technicznymi i naturalnymi. Czynniki ludzkie i techniczne powodują awarie techniczne, niepokoje społeczne oraz zdarzenia terrorystyczne, natomiast czynniki naturalne powodują katastrofy naturalne. Faulkner definiuje awarie jako wewnętrzne, które mogą być kontrolowane przez społeczność lub organizację, podczas gdy katastrofy naturalne mają charakter zewnętrzny i pozostają poza ich kontrolą [Faulkner 2001]. Faulkner przedstawia sześć faz sytuacji kryzysowej w strukturze zarządzania kryzysowego. Fazy te obejmują fazę przedkryzysową, prodromalną, awaryjną, pośrednią, długoterminowy powrót do stanu

normalnego i zakończenie. W sytuacji eskalacji sytuacji kryzyowej poza poziom dopuszczalny, zaistnienie sytuacji szczególnego zagrożenia oraz niemożność przeciwstawienia się temu szczególnemu zagrożeniu za pomocą zwykłych środków konstytucyjnych istnieje możliwość wprowadzenia jednego z trzech stanów nadzwyczajnych tj.: stanu klęski żywiołowej, stanu wyjątkowego lub stanu wojennego. Przez stany nadzwyczajne rozumie się rozwiązania prawne, które mają przeciwdziałać lub zmniejszać skutki zagrożeń, które polegają na ograniczeniu realizacji wolności i praw jednostki oraz na odstąpieniu od przyjętego w Konstytucji systemu sprawowania władzy z powodu wystąpienia stanu szczególnego zagrożenia. Podstawowa charakterystyka stanów nadzwyczajnych została przedstawiona w Tabeli 1.

Tabela 1

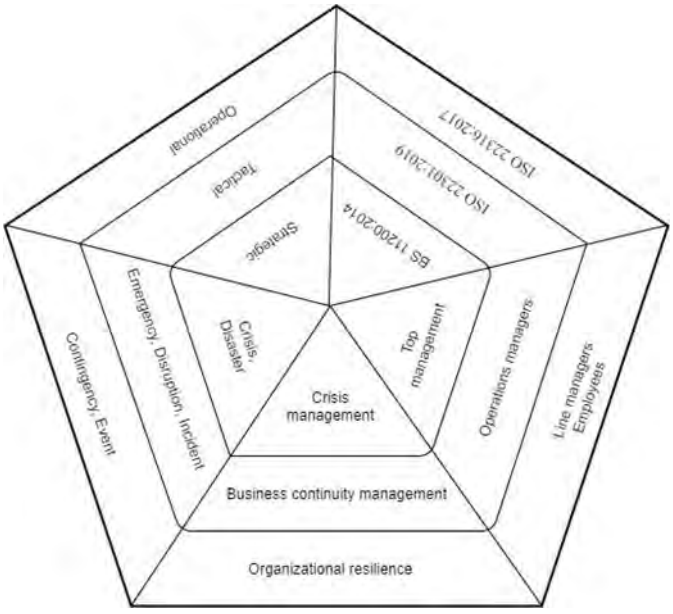
Podstawowa charakterystyka stanów nadzwyczajnych

	Stan Klęski Żywiołowej	**Stan Wyjątkowy**	**Stan Wojenny**
Warunki wprowadzenia	• Zapobieżenie lub usunięcie skutków katastrof naturalnych lub awarii technicznych noszących znamiona klęski żywiołowej	• Zagrożenie konstytucyjnego ustroju państwa • Zagrożenie bezpieczeństwa państwa • Zagrożenie porządku publicznego	• Zagrożenie państwa • Zbrojna napaść na terytorium RP • Zobowiązanie do wspólnej obrony wynikające z umów międzynarodowych
Podmiot wprowadzający	Rada Ministrów	Prezydent RP na wniosek Rady Ministrów	Prezydent RP na wniosek Rady Ministrów
Czas wprowadzenia	• Czas oznaczony maksymalnie 30 dni • Przedłużenie może nastąpić za zgodą Sejmu RP	• Na czas oznaczony maksymalnie 90 dni • Przedłużenie może nastąpić tylko raz, za zgodą Sejmu RP, na maksymalnie 60 dni	• Nie określono

Źródło: [Ustawa o stanie klęski żywiołowej, 18.04.2002; Ustawa o stanie wyjątkowym, 21.06.2002; Ustawa o stanie wojennym, 29.08.2002]

W obronie przed zagrożeniami mogącymi wywołać sytuacją kryzysową kluczową rolę odgrywają kwestie zarządzania kryzysowego (CM), zarządzania ciągłością działania (BCM) oraz odporności organizacyjnej (OR). Wspomniana triada przedstawia

elementy koncepcji integracji korporacyjnych systemów zarządzania przywracających zdolności operacyjne organizacji opartej na standardach [Ewertowski 2022]. Na rys. 2 przedstawiono graficzny model przedmiotowej koncepcji.



Rys. 2. Koncepcja integracji korporacyjnych systemów zarządzania przywracających zdolności operacyjne organizacji oparta na standardach zobrazowana w formie pięciokątnej piramidy. Źródło: [Ewertowski 2022].

Przedstawione zintegrowane obszary, takie jak zarządzanie kryzysowe, zarządzanie ciągłością działania i odporność organizacji, łącznie mogą wspierać bezpieczeństwo oraz pozwalać na utrzymanie trwałości i ciągłość organizacji. Koncepcja ujęta w piramidzie pięciokątnej zapewnia metodę zwiększania gotowości organizacji do zarządzania incydentami i łagodzenia dotkliwości zakłóceń. Jest to warunek przetrwania organizacji w niepewnym środowisku. Tylko organizacja tak przygotowana do minimalizowania ryzyka utraty ciągłości działania i eskalacji sytuacji kryzysowych może realizować zrównoważony rozwój. Przez zarządzanie kryzysowe rozumiemy holistyczny proces zarządzania, który identyfikuje potencjalne zagrożenia organizacji i zapewnia ramy dla budowania odporności, z możliwością skutecznej reakcji, która chroni zainteresowane strony, ich reputację, markę i działania tworzące wartość, a także skutecznie przywracające zdolności operacyjne organizacji [ISO 22300:2018]. Przez zarządzanie ciągłością działania rozumiemy holistyczny proces zarządzania, który identyfikuje potencjalne zagrożenia dla organizacji oraz wpływ, jaki te zagrożenia, jeśli są realizowane, mogą powodować dla jego działalności, a także zapewnia ramy dla budowania odporności organizacji z możliwością skutecznego reagowania, która zabezpiecza interesy jej kluczowych interesariuszy, reputacji, marki i działań

tworzących wartość [ISO 22300:2018]. Przez odporność organizacyjna rozumiemy z kolei zdolność organizacji do absorbcji i adaptacji w zmieniającym się środowisku [ISO 22300:2018].

Odporność organizacji zwiększa się, gdy organizacja ma zdolność przewidywania, planowania i reagowania na zmiany. Organizacja powinna ustalać priorytety i zapewnić, że dyscypliny zarządzania przywracające zdolności operacyjne organizacji są wystarczająco solidne i skuteczne, aby reagować na te zmiany. Bardzo ważne jest aby organizacja zachowała świadomość sytuacji, które mogą wpłynąć na zmianę. Jednym z głównych modeli do definiowania świadomości sytuacyjnej jest model trójpoziomowy polegający na percepcji elementów środowiska w obrębie objętości czasu i przestrzeni, zrozumienie ich znaczenia oraz projekcja ich stanu w najbliższej przyszłości [Endsley 1988]. Poziomy te opisujemy następująco:

1) Percepcja elementów otoczenia – identyfikacja elementów lub zdarzeń, które pozwalają określić sytuację. Ten poziom oznacza kluczowe elementy sytuacji dla kolejnych poziomów w późniejszym przetwarzaniu.
2) Zrozumienie obecnej sytuacji – połączenie wydarzeń z 1. poziomu we wzorzec. Na tym poziomie określony zostaje obecny stan w celu szybkiego podejmowania decyzji i działań.
3) Projekcja przyszłego stanu – projekcja bieżącej sytuacji w przyszłości a także próba przewidzenia rozwoju sytuacji taktycznej. Ten poziom wspiera krótkoterminowe planowanie oraz pozwala na ocenę różnych opcji, jeżeli dostępny jest czas.

W celu poprawy świadomości sytuacyjnej w sytuacji kryzysowej organizacja potrzebuje proaktywnego przetwarzania informacji, które wymaga nowoczesnych rozwiązań technologicznych. Widoczne jest to również w obszarze zarządzania kryzysowego, zarządzania ciągłością działania oraz odporności organizacyjnej. Jednym z przykładów wykorzystania nowoczesnych technologii w sytuacji kryzysowej mogą być systemy informacji przestrzennej (GIS). Definiujemy je jako systemy pozyskiwania, przetwarzania i udostępniania danych zawierających informacje przestrzenne oraz towarzyszące im informacje opisowe o obiektach wyróżnionych w części przestrzeni objętej działaniem systemu [Gaździcki, 1990]. Przetwarzając liczne, szczegółowe dane, zawarte w wielu programach komputerowych, dokonuje się analiz przestrzennych, które umożliwiają przewidywanie zjawisk oraz pozwalają na lepsze funkcjonowanie służb kryzysowych oraz ratowniczych. Są również one szeroko wykorzystywane w administracji publicznej, planowaniu przestrzennym, geodezji, zarządzaniem infrastrukturą, ochroną środowiska, rozwojem regionalnym" (Ziębicki, 2014). Wpływając na zmiany społeczno-gospodarcze systemy informacji przestrzennej tworzą społeczeństwo informacyjne [Feltynowski M. 2009]. Systemy informacji przestrzennej w porównaniu do innych systemów informacyjnych charakteryzują się występowaniem w nich informacji przestrzennej. Informacją przestrzenną jest informacja o położeniu (współrzędne w przyjętym układzie odniesienia), własnościach geometrycznych, relacjach przestrzennych obiektów, które są przedmiotem zainteresowania systemu i mogą być identyfikowane w odniesieniu do Ziemi [https://gisplay.pl/gis/definicje-gis.html, 25.06.2022].

Jednym z przykładów wykorzystania nowoczesnych technologii GIS w sytuacji kryzysowej może być aplikacja OpenStreetMap. OpenStreetMap (OSM) to globalny projekt mający na celu stworzenie darmowej oraz swobodnie dostępnej mapy świata. Co najważniejsze, może być edytowana przez każdego, przez co nazywana jest także kartograficznym odpowiednikiem Wikipedii. Wszelkie dane zawarte w projekcie udostępniane są na otwartej licencji Open Database License (ODbL), co umożliwia dalsze ich wykorzystywanie, między innymi w systemach nawigacji GPS, co czyni ją darmową alternatywą dla drogich, niekoniecznie lepszych, map komercyjnych. Sam projekt, założony w 2004 roku, tworzy obecnie ponad 600 tysięcy mapowiczów (jak nazywają siebie zarejestrowani użytkownicy edytujący OSM), a wszystkie przesłane obiekty "ważą" ponad 200 gigabajtów [openstreetmap.org.pl, 2.06.2022].

2. MATERIAŁY I METODY

W celu zbadania wpływu wykorzystania aplikacji OpenStreetMap do zarządzania szeroko rozumianym bezpieczeństwem sytuacji kryzysowej przygotowano proste pilotażowe badanie ankietowe oparte na studentach WIZ PP znających aplikację. Główne problem badawczy dotyczył ustalenia przydatności aplikacji OSM i ewentualnie jej optymalizacji do wybranych dyscyplin zarządzania, sytuacji awaryjnych oraz stanów nadzwyczajnych. Badanie przeprowadzono w miesiącach maj-czerwiec 2022 roku. W kwestionariuszu zadano 7 pytań (treść pytań została przedstawiona na rysunkach 3-8). Odpowiedzi były standaryzowane poprzez wykorzystanie pięciostopniowej skali Likerta. W ujęciu uproszczonym często „skalą Likerta" nazywa się wyborem jednego z pięciu wypowiedzi ułożonych w porządku od całkowitego odrzucenia do całkowitej akceptacji:

- zdecydowanie nie zgadzam się,
- raczej się nie zgadzam,
- nie mam zdania,
- raczej się zgadzam,
- zdecydowanie się zgadzam

Respondent wybiera odpowiedź, która najbardziej odpowiada jego odczuciom. Wykorzystując nieparzystą liczbę możliwych opcji do wyboru uzyskujemy możliwość wprowadzenia środkowego stwierdzenia, które będzie stanowiło neutralny wybór.

Analiza danych z pomiaru za pomocą skali Likerta polega na porównaniu i interpretacji zliczonych punktów dla kategorii. Pozwala to na ocenę siły poglądu konkretnych pytań [Węziak-Białowolska 2011].

Ponadto ankietowanych zapytano o obiektywną oceny ogólnej efektywności aplikacji OpenStreetMap do wybranych zastosowań, wykorzystując analizę SWOT

(SWOT to skrót od słów: Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats, co oznacza: mocne strony, słabe strony, szanse i zagrożenia).

Badanie zostało przeprowadzone metodą CAWI, tj. z ang. Computer Assisted Web Interview – metoda przeprowadzania wywiadu przy pomocy ankiety zamieszczonej w Internecie. W ankiecie ujęto informację, że ankieta jest anonimowa i służyć będzie celom wyłącznie naukowym. Łącznie uzyskano 16 odpowiedzi.

3. WYNIKI

Na podstawie wyników przeprowadzonych badania ankietowego sporządzono zestawienie umożliwiające interpretację wyników:

1) Pytanie nr 1

Rys. 3. Odpowiedzi na pytanie nr 1. Źródło: opracowanie własne

Tabela 2

Analiza SWOT do pytania nr 1

Mocne strony (S)	Słabe strony (W)
1) Poprawa zrozumienia procedur oraz procesu ewakuacji 2) Łatwa dostępność on-line 3) Dostęp do aktualizacji 4) Duża dokładność 5) Świadomość sytuacyjna 6) Łatwość dostępu 7) Możliwość planowania	1) Brak umiejętności przez wszystkich uczestników sytuacji awaryjnej 2) Wykluczenie informatyczne 3) Łatwa edytowalność przez każdego 4) Trudności przy braku dostępu do Internetu 5) Przesycenie danymi
Szanse (O)	**Zagrożenia (T)**
1) Zwiększenie efektywności realizacji procedur awaryjnych 2) Unifikacja oprogramowania przez różne instytucje 3) Wykorzystanie w sytuacji kryzysowej 4) Upowszechnienie informacji o dostępności map 5) Poprawa ewakuacji	1) Ataki hackerskie 2) Możliwość wykorzystania przez osoby w niewłaściwym celu 3) Brak aktualności

Źródło: opracowanie własne

2) Pytanie nr 2

Rys. 4. Odpowiedzi na pytanie nr 2. Źródło: opracowanie własne

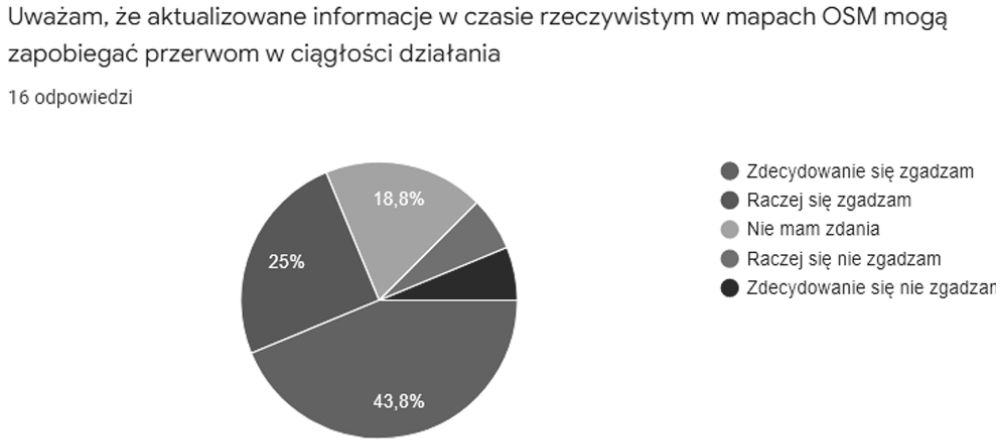
Tabela 3

Analiza SWOT do pytania nr 2

Mocne strony (S)	Słabe strony (W)
1) Poprawa wykorzystania map zagrożeń oraz ryzyka 2) Pomoc w przygotowaniu procedur i planów 3) Nowoczesne narzędzie z lepszą funkcjonalnością 4) Zawarcie informacji kontekstowych	1) Brak umiejętności przez wszystkich uczestników zarządzania 2) Potrzeba czasu na zapoznanie się 3) Niska czytelność map
Szanse (O)	**Zagrożenia (T)**
1) Zwiększenie efektywności realizacji procedur zarządzania kryzysowego 2) Możliwość uszczegółowienia map 3) Zainteresowanie szerszej społeczności	1) Odzwierciedlenie dynamicznej sytuacji w czasie rzeczywistym 2) Podatność na złośliwe działania

Źródło: opracowanie własne

3) Pytanie nr 3



Rys. 5. Odpowiedzi na pytanie nr 3. Źródło: opracowanie własne

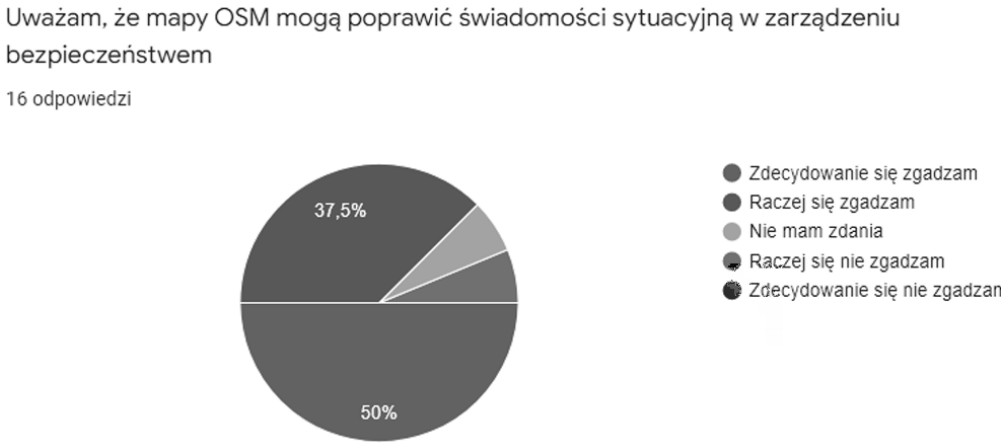
Tabela 4

Analiza SWOT do pytania nr 3

Mocne strony (S)	Słabe strony (W)
1) Powszechna dostępność 2) Aktualność informacji pozwalająca na dłużej zachować bezpieczeństwo 3) Rozpoznanie sytuacji 4) Możliwość aktualizacji na dużą skalę 5) Brak ograniczeń w dodawaniu informacji	1) Powszechna dostępność bez administratora porządkującego informację, 2) Konieczność angażowania osób do ciągłych aktualizacji 3) Potrzeba uwiarogodnienia podanych informacji
Szanse (O)	**Zagrożenia (T)**
1) Zobrazowanie dynamiczne informacji 2) Zwiększenie bezpieczeństwa 3) Szybsze reagowanie 4) Prowadzenie prac rozwojowych	1) możliwość wprowadzenia błędnych informacji, 2) Kłopoty z połączeniem internetowym 3) Brak czasu na weryfikację danych 4) Celowe wprowadzanie w błąd 5) Szum informacyjny

Źródło: opracowanie własne

4) Pytanie nr 4



Rys. 6. Odpowiedzi na pytanie nr 4. Źródło: opracowanie własne

Tabela 5

Analiza SWOT do pytania nr 4

Mocne strony (S)	Słabe strony (W)
1) Większy zasób informacyjny 2) Możliwość przedstawienia kluczowych dla bezpieczeństwa danych 3) Brak ograniczeń	1) Możliwość wprowadzenia błędnych informacji 2) Przesyt informacyjny 3) Dowolność interpretacji 4) Mało rozpropagowane źródło informacji
Szanse (O)	**Zagrożenia (T)**
1) Zwiększenie świadomości sytuacyjnej 2) Możliwość przygotowania wcześniej procedur 3) Poprawa informacji o budynkach 4) Budowanie rozszerzonej rzeczywistości	1) Wprowadzanie w błąd 2) Nieprecyzyjne procedury 3) Wykluczenie informatyczne, zmniejszające dostępność 4) Brak jasno zdefiniowanych słowników

Źródło: opracowanie własne

5) Pytanie nr 5

Rys. 7. Odpowiedzi na pytanie nr 5. Źródło: opracowanie własne

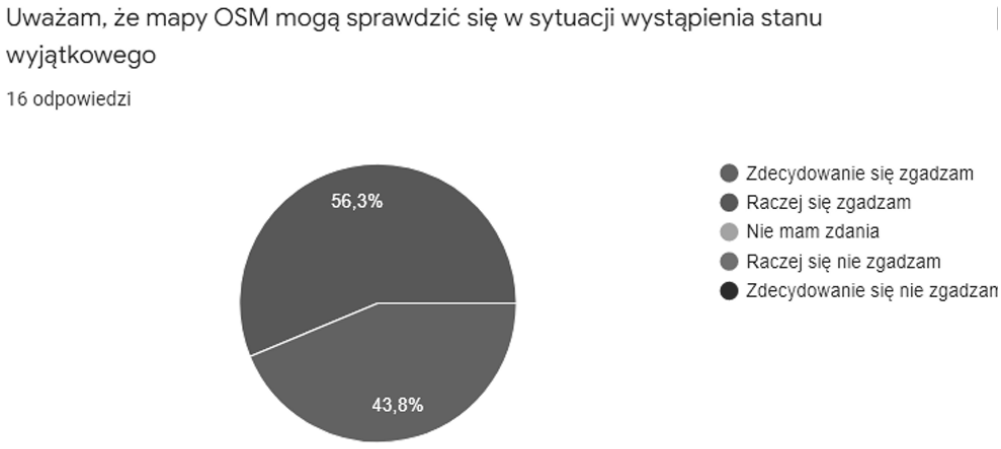
Tabela 6

Analiza SWOT do pytania nr 5

Mocne strony (S)	Słabe strony (W)
1) Zobrazowanie dynamiczne danych 2) Dostępność 3) Poprawa świadomości sytuacyjnej 4) Aktualność	1) Dostępność 2) Bezużyteczność 3) Przechwycenie danych przez wroga
Szanse (O)	**Zagrożenia (T)**
1) Zwiększenie skuteczności zarządzania 2) Wykorzystanie przez służby ratunkowe 3) Kodowanie informacji 4) Poprawa świadomości sytuacyjnej	1) Wykorzystanie przez wroga 2) Ataki hackerskie 3) Możliwość złamania kodów

Źródło: opracowanie własne

6) Pytanie nr 6



Rys. 8. Odpowiedzi na pytanie nr 6. Źródło: opracowanie własne

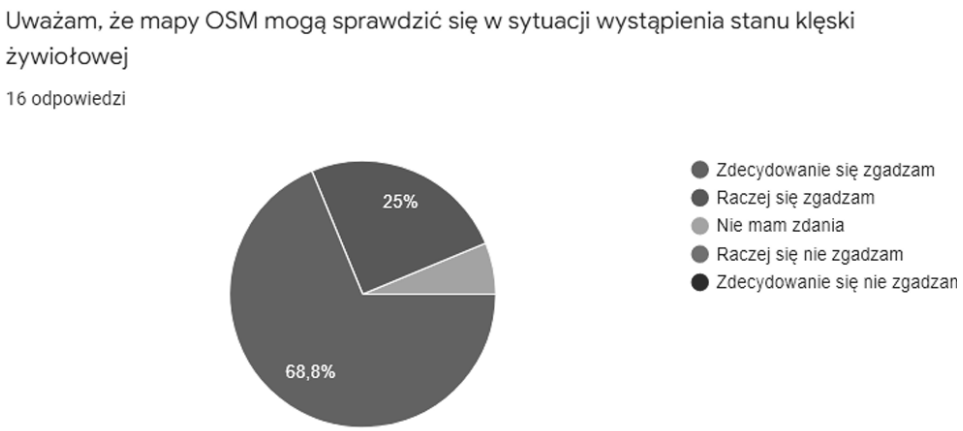
Tabela 7

Analiza SWOT do pytania nr 6

Mocne strony (S)	Słabe strony (W)
1) Dynamiczne zobrazowanie zmian 2) Sprawdzenie dostępności infrastruktury	1) Powszechny dostęp 2) Zmienność sytuacji 3) Możliwość wprowadzenia błędnych informacji
Szanse (O)	**Zagrożenia (T)**
1) Zwiększenie skuteczności zarządzania 2) Zmniejszenie dezorientacji	1) Możliwość wprowadzenia błędnych informacji 2) Ataki hackerskie

Źródło: opracowanie własne

7) Pytanie nr 7



Rys. 9. Odpowiedzi na pytanie nr 7. Źródło: opracowanie własne

Tabela 8

Analiza SWOT do pytania nr 7

Mocne strony (S)	Słabe strony (W)
1) Zobrazowanie dynamicznych zmian 2) Opracowanie procedur 3) Wykorzystanie przez osoby przebywające w obiektach infrastruktury 4) Koordynacja służb 5) Wspieranie operacji humanitarnych	1) Brak umiejętności wykorzystania 2) Zmienność sytuacji 3) Nieodporność infrastruktury technicznej 4) Potrzeba synchronizacji z innymi źródłami
Szanse (O)	**Zagrożenia (T)**
1) Zwiększenie skuteczności zarządzania 2) Obniżenie strat	1) Możliwość wprowadzenia błędnych informacji 2) Możliwość zniszczenia infrastruktury technicznej

Źródło: opracowanie własne

4. PODSUMOWANIE

Z ustaleń badania pilotażowego wynika, że aplikacja OSM jest bardzo przydatna dla wybranych dyscyplin zarządzania, sytuacji awaryjnych oraz stanów nadzwyczajnych. Jednakże istnieją różnice w postrzeganiu tej przydatności przez respondentów. Z tego powodu można wstępnie zoptymalizować przydatność do poszczególnych z badanych kategorii. Generalnie można stwierdzić, że zdecydowanie częściej wybierane były kategorie pozytywne (zdecydowanie się zgadzam oraz raczej się zgadzam), czyli odpowiadające lepszemu postrzeganiu przydatności aplikacji w badanych kategoriach. Najlepiej respondenci postrzegają przydatność GIS w sytuacjach awaryjnych – 100% kategorii pozytywnych (odpowiednio: „zdecydowanie się zgadzam" – 68,8% oraz „raczej się zgadzam" – 31,2%). Do mocnych stron przydatności respondenci zaliczają głównie poprawę zrozumienia procedur i procesu ewakuacji oraz łatwą dostępność on-line. Do słabych stron respondenci zaliczają brak umiejętności posługiwania się aplikacją przez wszystkich uczestników sytuacji awaryjnej oraz trudności przy braku dostępu do Internetu. Jako szansę respondenci uznają zwiększenie efektywności realizacji procedur awaryjnych, natomiast jako zagrożenie ataki hackerskie. Z kategorii dyscyplin zarządzania najlepiej ocenianą jest przydatność GIS w zarzadzaniu kryzysowym – 93,8% kategorii pozytywnych (odpowiednio: „zdecydowanie się zgadzam" – 50,0% oraz „raczej się zgadzam" – 43,8%).

Do mocnych stron przydatności respondenci zaliczają głównie poprawę wykorzystania map zagrożeń i ryzyka oraz pomoc w przygotowaniu procedur i planów. Do słabych stron respondenci zaliczają brak umiejętności posługiwania się aplikacją przez wszystkich uczestników. Jako szansę respondenci uznają zwiększenie efektywności realizacji procedur zarządzania kryzysowego, natomiast jako zagrożenie podatności na złośliwe działania. Na drugim biegunie dyscyplin zarządzania gorzej ocenianą jest przydatność GIS w zarządzaniu ciągłością działania – 93,8% kategorii pozytywnych (odpowiednio: „zdecydowanie się zgadzam" – 43,8% oraz „raczej się zgadzam" – 25,0%). Do mocnych stron przydatności respondenci zaliczają głównie powszechną dostępność oraz aktualność informacji pozwalająca na dłużej zachować bezpieczeństwo. Do słabych stron respondenci zaliczają powszechną dostępność bez administratora porządkującego informację. Jako szansę respondenci uznają zobrazowanie dynamiczne informacji, natomiast jako zagrożenie możliwość wprowadzenia błędnych informacji oraz kłopoty z połączeniem internetowym. Z kategorii stanów nadzwyczajnych najlepiej ocenianą jest przydatność GIS podczas Stanu wyjątkowego oraz stanu klęski żywiołowej – odpowiednio 100%/92,8%/ kategorii pozytywnych (odpowiednio: „zdecydowanie się zgadzam" – 43,8%/68,8% oraz „raczej się zgadzam" – 56,3%/25,0%). Do mocnych stron przydatności respondenci zaliczają głównie dynamiczne zobrazowanie zmian oraz możliwość opracowania procedur. Do słabych stron respondenci zaliczają brak umiejętności posługiwania się aplikacją oraz zmienność sytuacji. Jako szansę respondenci uznają zwiększenie efektywności zarządzania, natomiast jako zagrożenie ataki hackerskie. Na drugim biegunie kategorii stanów nadzwyczajnych gorzej ocenianą jest przydatność GIS w stanie wojennym – 62,5% kategorii pozytywnych (odpowiednio: „zdecydowanie się zgadzam" – 37,5% oraz „raczej się zgadzam" – 25,0%). Do mocnych stron przydatności respondenci zaliczają głównie zobrazowanie dynamiczne danych. Do słabych stron respondenci zaliczają możliwość przechwycenia danych przez wroga. Jako szansę respondenci uznają zwiększenie skuteczności zarządzania, natomiast jako zagrożenie wykorzystanie przez wroga.

Generalnie można stwierdzić, że potencjał tych rozwiązań jest dobry i stale się rozwija, co sprawia, że systemy informacji przestrzennej są obiecująca dziedzina badań i wdrożeń w zarządzaniu kryzysowym.

To badanie ma pewne ograniczenia. Wynik ten dotyczy tylko badanej próby. Ze względu na wielkość próby badanie to jest pilotażowe i nie jest rozstrzygające oraz nie może być uogólniane. Próba obejmuje tylko studentów Inżynierii Bezpieczeństwa Politechniki Poznańskiej zaznajomionych z zarządzaniem kryzysowym oraz GIS. Z tych powodów może to być postrzegane jako błąd selekcji. Dlatego należy przeprowadzić dalsze badania w większej liczbie podmiotów, aby ostatecznie zweryfikować problem badawczy. Uważa się jednak, że badani studenci zapewniają zadowalającą reprezentatywność statystyczną dla wstępnych wniosków. Dzięki temu mogą być interesującym elementem w dyskusji na temat przyszłego rozwoju GIS w zarządzaniu kryzysowym.

LITERATURA

Pozycje książkowe

1. Feltynowski M. 2009, Systemy informacji przestrzennej jako narzędzie wzmacniania innowacyjności regionu, [w:] Budowanie zdolności innowacyjnych regionów, red. Aleksandra Nowakowska, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź
2. Gaździcki J. 1990, Systemy Informacji Przestrzennej, Polskie Przedsiębiorstwo Wydawnictwa Kartograficznego, Warszawa,
3. Nowak E. 2007, Zarządzanie kryzysowe w sytuacjach niemilitarnych, Wydawnictwo Akademii Obrony Narodowej, Warszawa
4. Węziak-Białowolska D., 2011, Operacjonalizacja i skalowanie w ilościowych badaniach społecznych, ISiD Working Papers, nr 16,
5. Ziębicki B. 2014, Zastosowanie systemów informacji przestrzennej w administracji publicznej, [w:] Problemy zarządzania organizacjami w społeczeństwie informacyjnym, red. Stabryła A., Wawak S., Mfiles. pl, Kraków,

Artykuły w czasopismach

1. Ewertowski, T., 2022, A Standard-Based Concept of the Integration of the Corporate Recovery Management Systems: Coping with Adversity and Uncertainty during a Pandemic. Sustainability 2022, 14. doi:10.3390/su14031254,
2. Faulkner, B. 2001, Towards a framework for tourism disaster management. Tour. Manag. 2001, 22, 135–147,

Artykuły w materiałach konferencyjnych

1. Endsley M. R., 1988, Design and evaluation for situational awareness enhancement, Proceedings of the Human Factors Society 32nd annual meeting Santa Monica HFES,

Normy

1. BS 11200:2014 Crisis Management—Guidance and good practice. Dostępny online: https://shop.bsigroup.com/products/crisismanagement-guidance-and-good-practice-1/standard (dostęp 23 czerwiec 2021),
2. ISO 22300:2018 - Security and resilience – Vocabulary, 2018,
3. ISO 22301:2019 - Security and resilience — Business continuity management systems — Requirements, 2019,
4. ISO 22316: 2017; Security and Resilience—Organizational Resilience—Principles and Attributes. ISO: Geneva, Switzerland, 2017,Nowak, E. (2007), Zarządzanie kryzysowe w sytuacjach zagrożeń niemilitarnych, Akademia Obrony Narodowej, Warszawa, AON 5831/07,

Rozporządzenia

1. Ustawa z dnia 18 kwietnia 2002 r. o stanie klęski żywiołowej, Dz.U. 2002 nr 62 poz. 558 z późn. zmianami,
2. Ustawa z dnia 21 czerwca 2002 r. o stanie wyjątkowym, Dz.U. 2002 nr 113 poz. 985 z późn. zmianami,
3. Ustawa z dnia 29 sierpnia 2002 r. o stanie wojennym oraz o kompetencjach Naczelnego Dowódcy Sił Zbrojnych i zasadach jego podległości konstytucyjnym organom Rzeczypospolitej Polskiej, Dz.U. 2002 nr 156 poz. 1301 z późn. zmianami,

Komunikaty Internetowe

1. https://openstreetmap.org.pl/o-openstreetmap/o-projekcie/, (dostęp 3 czerwiec 2022),
2. https://gisplay.pl/gis/definicje-gis.html, 25.06.2022.

STUDY OF THE SUITABILITY OF USING MODERN GIS TECHNOLOGIES IN CRISIS SITUATIONS FOR SELECTED MANAGEMENT DISCIPLINES AND EMERGENCIES

ABSTRACT

The aim of this study is to investigate the suitability of using modern GIS technologies in a crisis situation for selected management disciplines and emergencies. The authors, based on, inter alia, on the taxonomy of national security states and the concept of integration of corporate management systems that restore operational capabilities of the organization after disruptions, present the results of suitability studies. Empirical research was carried out on a group of students from the Poznań University of Technology. The research methodology is based on a questionnaire. Using the survey results, it was found that GIS applications are very useful for selected management disciplines, emergency situations and emergency states. However, there are differences in the perception of this usefulness by the respondents and therefore the hierarchy of usefulness has been presented. The main conclusions from the study show that the use of modern GIS technologies in a crisis situation improves the quality of management and allows for universal availability of spatial information in a crisis situation.

Keywords: Crisis management, Geographic Information System, organizational resilience, business continuity management

Maksymilian FALBIERSKI*
Bartosz ZIEGLER**

PROJEKT I ANALIZA SYSTEMU RÓWNOWAŻENIA SIŁ OSIOWYCH NA WIRNIKU TURBOPOMPY SILNIKA RAKIETOWEGO

Artykuł prezentuje proces projektowy i budowę systemu równoważenia sił osiowych oddziałujących na wirnik turbopompy silnika rakietowego. Bazując na znanych metodach dobrano możliwe do zastosowania warianty. W celu ułatwienia wyboru odpowiedniej opcji opracowano model analityczny wskazujący w przybliżeniu zasadność danych rozwiązań, a następnie uzyskane przy jego pomocy wyniki porównano z analizami numerycznymi CFD. Wynikiem pracy jest propozycja rozwiązania problemu równoważenia sił osiowych na wirniku turbopompy budowanej przez studencki zespół badawczy PUT RocketLab.

Słowa kluczowe: Turbopompa, Równoważenie sił osiowych, CFD

SPIS SYMBOLI

A	pole powierzchni	p	ciśnienie statyczne
c	prędkość przepływu	q	ciśnienie dynamiczne
h	wysokość (szczeliny, luzu)	r	promień
$\dot{m}$	masowe natężenie przepływu	α	współczynnik zawirowania
$\dot{Q}$	objętościowe natężenie przepływu	ω	prędkość kątowa
		ζ	współczynnik strat miejscowych

1. WPROWADZENIE

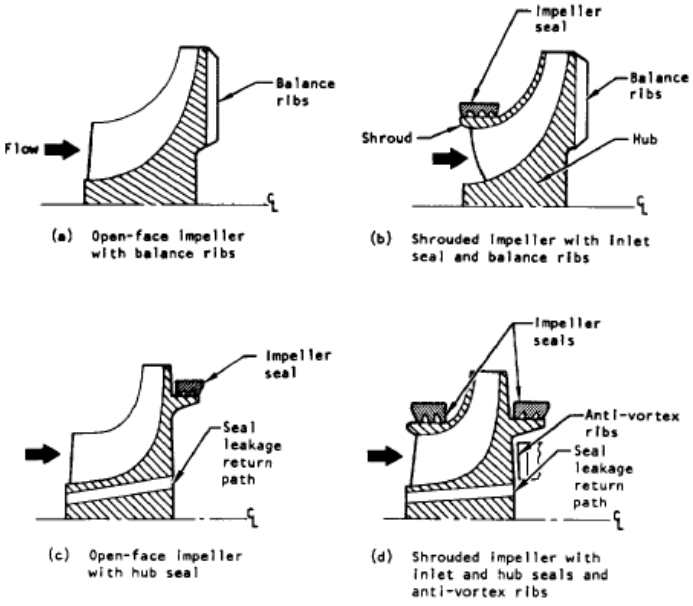
Turbopompy to wysokowydajne urządzenia, składające się ze współpracujących ze sobą turbiny i pompy tłoczącej ciekłe materiały pędne do układu wtryskowego silnika rakietowego. Z powodu wysokiego zapotrzebowania silnika rakietowego na masowe natężenie przepływu i ciśnienie paliwa oraz utleniacza, turbopompy są urządzeniami o najwyższych gęstościach mocy spotykanych we współczesnej inżynierii.

Wspomniane wysokie gęstości mocy, wymuszają zarówno bardzo duże prędkości elementów roboczych (zarówno obrotowe, jak i liniowe), jak i duże obciążenia tych elementów (głównie siły pochodzenia aero i hydrodynamicznego). Z tych powodów, turbopompy silników rakietowych wymagają stosowania niestandardowych rozwiązań zarówno w kontekście uszczelniania, jak i łożyskowania wirników, niespotykanych w innych maszynach przepływowych.

Niniejszy artykuł nawiązuje do problematyki kontrolowania sił osiowych generowanych przez wysokoobrotową pompę promieniową, tak, by sam wirnik pompy działał jak dwustronne, hydrostatyczne łożysko oporowe. Dzięki temu układ łożysk wirnika nie musi przenosić żadnych sił osiowych - co zważywszy na wysokie prędkości obrotowe jest kluczowe dla ilości wydzielanego w łożyskach ciepła i ich trwałości. Projekt turbopompy, do którego odnosi się artykuł jest projektem realizowanym w ramach grantu Ministerstwa Edukacji i Nauki, studenckie koła naukowe tworzą innowacje pt. High performance rocket engine demonstrator - realizowanego przez studencką grupę badawczą PUT Rocketlab.

2. PRZEGLĄD METOD RÓWNOWAŻENIA SIŁ OSIOWYCH W TURBOPOMPACH

Równoważenie sił osiowych oddziałujących na układ wirnikowy turbopompy realizuje się zazwyczaj poprzez rozwiązania bazujące na różnych konfiguracjach współpracujących ze sobą uszczelnień, żeber dociążających i odciążających oraz kanałów przepływowych, determinujących rozkład ciśnień oddziałujących na zestaw pracujących wirników.

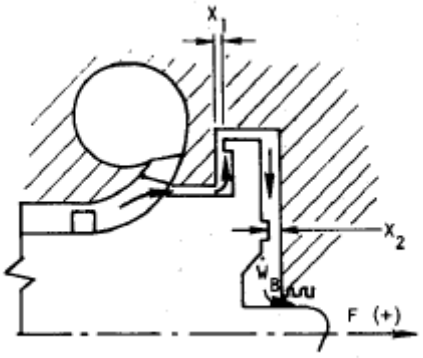


Rys. 1. Typowe konfiguracje rozwiązań równoważących siły osiowe na układach wirnikowych [Furst, Keller, 1973].

Konfiguracja przedstawiona na Rys. 1(a) wykorzystuje otwarty wirnik współpracujący z zintegrowanym układem żeber odciążających, generujących wysoki gradient ciśnienia oddziałujący na ścianę wirnika. Dany typ żeber zmniejsza przeciek pompowanego utleniacza lub paliwa do wartości bliskich zera. Inna konfiguracja bazująca na otwartym wirniku (Rys. 1(c)) wykorzystuje połączenie współpracujących ze sobą uszczelnienia i kanału powrotnego na wlot płynu, wymuszającego ustalenie się wartości ciśnienia za wirnikiem (poniżej uszczelnienia) na poziomie równym z ciśnieniem panującym na wlocie do pompy. Powyżej uszczelnienia tworzy się obszar ciśnienia o wartości bliskiej tej z wylotu pompy. Proporcje wielkości komór utworzonych przez uszczelnienie definiują siły napierające na tylną ścianę wirnika. Konstrukcja tego typu charakteryzuje się prostą budową, jednak posiada ograniczony zakres pracy przez co naraża łożyskowanie na obciążenia osiowe podczas działania poza punktem optymalnym.

Konfiguracje z zabudowanym wirnikiem (Rys. 1(b,d)) dzięki zamkniętej konstrukcji (ciśnienie napierające na piastę i obudowę wirnika tworzy siły, które wzajemnie się redukują) wymagają układów generujących mniejsze siły osiowe. Dla wirników otwartych, stosuje się rozwiązania w postaci żeber balansujących (odciążających) i kanałów wyrównujących ciśnienie panujące za wirnikiem, z ciśnieniem wlotowym. Żebra przeciw zawirowaniom (Rys. 1(d)) i ich hydrodynamiczne wła-

ściwości wykorzystuje się w celu zwiększenia zakresu pracy działania systemu redukcji sił osiowych przy jednoczesnym wykorzystaniu wariantu z uszczelnieniem za wirnikiem dzielącym obszar na dwie komory o różnych ciśnieniach.



Rys. 2. Schemat układu równoważącego siły osiowe w turbopompach z rodziny Mark 9, Mark 15-F, Mark 25, Mark 26 [Scheer, Viteri, Farquhar, 1978].

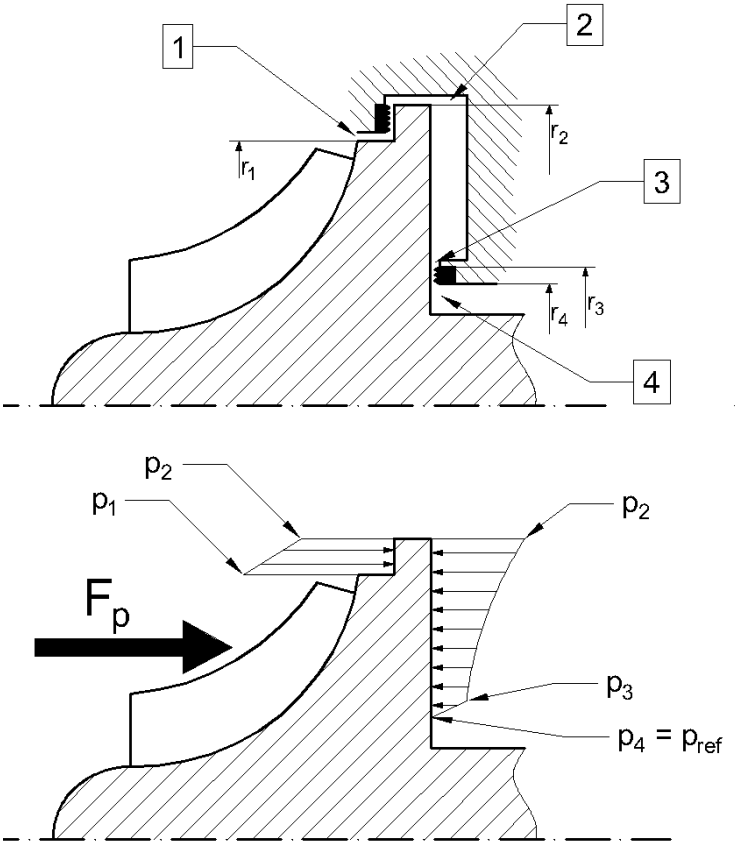
Schemat układu balansującego przedstawiony na Rys. 2 wykorzystywano z powodzeniem w całej rodzinie turbopomp. Działanie systemu opiera się na wykorzystaniu wirnika jako tłoczka, na który napiera ciśnienie ustalające się w wyniku przecieku. Wykorzystuje się dwa dławiki pomiędzy, którymi ustala się ciśnienia odpowiedzialne za wspomniany napór na ścianę. Ruch osiowy wirnika zmienia wzajemne relacje strat ciśnienia na dławikach, generując zmiany ciśnienia przeciwdziałające osiowemu ruchowi wirnika. Znajomość generowanych przez uszczelnienia strat ciśnienia pozwala zaprojektować wartości sił naporu. Konstrukcja tego typu sprawdza się w szerokim zakresie charakterystyki, ponieważ ciśnienie panujące między zwężkami jest całkowicie zależne od parametrów generowanych w danej chwili przez pompę oraz położenia wirnika.

3. MODEL ANALITYCZNY SYSTEMU PASYWNEJ KONTROLI POŁOŻENIA OSIOWEGO WIRNIKA

W celu dobrania odpowiednich wymiarów, a w szczególności luzów osiowych pomiędzy elementami dławiącymi przepływ za wirnikowy, stworzono analityczny model zmian ciśnienia statycznego we wspomnianym przepływie. Zakłada się, że przepływ ten będzie przepływem nieściśliwej cieczy bez przemian fazowych.

Dla takich założeń skorzystać można ze standardowych zależności na straty lokalne wykorzystujące empiryczne współczynniki strat. Model zaimplementowano następnie w języku Python 3.7.

Przepływ za wirnikiem analizowany jest jako szeregowe połączenie dławików pod postacią uszczelnień labiryntowych oraz objętości, w których płyn może wirować i tym samym generować promieniowy gradient ciśnienia. Przeciek za wirnikowy odbywa się od punktu 1, gdzie panuje ciśnienie równe ciśnieniu tłoczenia wirnika do punktu 4 znajdującego się za układem uszczelnień, które połączone jest hydraulicznie z wlotem pompy. Analizy zarówno sił, jak i natężeń przepływu, wykonywać można w przypadkach nieściśliwych, używając ciśnień względnych, dlatego też dla uproszczenia za ciśnienie odniesienia przyjmuje się tu statyczne ciśnienie na wlocie pompy.



Rys. 3. Schemat projektowanego układu i zakładany rozkład ciśnień

.

W punktach 1 i 4 znane są wartości ciśnienia statycznego. W punkcie 1 wartość nadciśnienia względem ciśnienia wlotowego pompy pochodzi z wyznaczonej numerycznie charakterystyki przepływowej wirnika. Ciśnienie w punkcie 4 jest natomiast równe wlotowemu (referencyjnemu), ponieważ obszar za wirnikiem połączony jest bezpośrednio z wlotem pompy, dzięki czemu czynnik roboczy pozostaje w obiegu. Zakłada się, że spadek ciśnienia wzdłuż uszczelnień labiryntowych pomiędzy punktami 1 i 2 oraz punktami 3 i 4 jest liniowy ze względu na nieściśliwość przepływu i założenie stałego przekroju każdego kolejnego zwężenia labiryntu.

Spadek ciśnienia na uszczelnieniach labiryntowych szacowany jest wg wzoru:

$$\Delta p = \sum_{i=1}^{n} q_i \zeta_i = n\bar{q}\bar{\zeta} = n\rho \frac{1}{2}\left(\frac{\dot{Q}}{2\pi \bar{r} h}\right)^2 \bar{\zeta} \tag{1}$$

gdzie : n - liczba stopni labiryntu, $\bar{x}$ - wartość średnia x

Powyższy wzór opisuje typową relację spadku ciśnienia wzdłuż przepływu nieściśliwego przez uszczelnienie labiryntowe. Jego wadą jest to, że podaje zawsze dodatnią wartość zmiany ciśnienia niezależnie od kierunku przepływu. W przypadku cofnięcia się przepływu przez uszczelnienie ($\dot{Q} < 0$) zmiana ciśnienia powinna mieć znak przeciwny. Dlatego też w tej pracy stosuje się relację tożsamościowo utrzymującą prawidłowy znak zmiany ciśnienia:

$$\Delta p_{A-B} = -\frac{n\rho\bar{\zeta}}{8(\pi\bar{r}h)^2} \dot{Q}_{A-B} \left|\dot{Q}_{A-B}\right| \tag{2}$$

Tak sformułowana zależność zwraca poprawną zmianę ciśnienia statycznego od punktu A do B niezależnie od tego, czy objętościowe natężenie przepływu od punktu A do B jest dodatnie, czy ujemne. Jest to szczególnie ważne, gdyż opisywana implementacja będzie również wykorzystywana do analiz drgań osiowych wirnika, przy których lokalny kierunek przepływu przez uszczelnienie nie jest z góry określony.

Czasami w literaturze zamiast współczynnika strat lokalnych elementu labiryntu podaje się jego współczynnik przepływu, odnoszący przepływ przez uszczelnienie do idealnie jednorodnego przepływu przez zwężenie uszczelnienia dla tej samej różnicy ciśnień statycznych:

$$C_d = \frac{\dot{m}_{rzeczywisty}}{\dot{m}_{idealny}} = \left(\frac{1}{\bar{\zeta}}\right)^2 \tag{3}$$

W przypadku objętości płynu za wirnikiem, która może wirować, występuje promieniowy gradient ciśnienia związany z tym wirowaniem.

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \rho r(\omega\alpha)^2 \tag{4}$$

Gdzie:

$$\alpha = \frac{\omega_{plynu}}{\omega_{wirnika}} \tag{5}$$

α - zwana dalej współczynnikiem zawirowania, należy do przedziału 0-1 i opisuje średnią prędkość kątową płynu w objętości za wirnikiem w odniesieniu do prędkości kątowej wirnika. W przypadku wirnika wyposażonego w żebra odciążające (wymuszające wirowanie płynu wraz z wirnikiem) α = 1. Dla żeber nieruchomych (odwirowujących) α = 0. W przypadku gdy nie ma żadnych żeber w modelu analitycznym, przyjmuje się że α = 0,5 choć jak wskazują dalsze analizy, nie jest to fizycznie prawidłowe założenie.

Znając ciśnienie na dowolnym promieniu r_A, można znaleźć ciśnienie na innym promieniu, całkując promieniowy gradient ciśnienia:

$$p(r) = p(r_A) + \int_{r_A}^{r} \rho(\omega\alpha)^2 r\, dr = p(r_A) + \rho(\omega\alpha)^2 \frac{r^2 - r_A^2}{2} \tag{6}$$

Siły osiowe pochodzące od takiego zmiennego profilu ciśnienia oddziałujące na fragment wirnika pomiędzy promieniami r_A oraz r_B określa zależność:

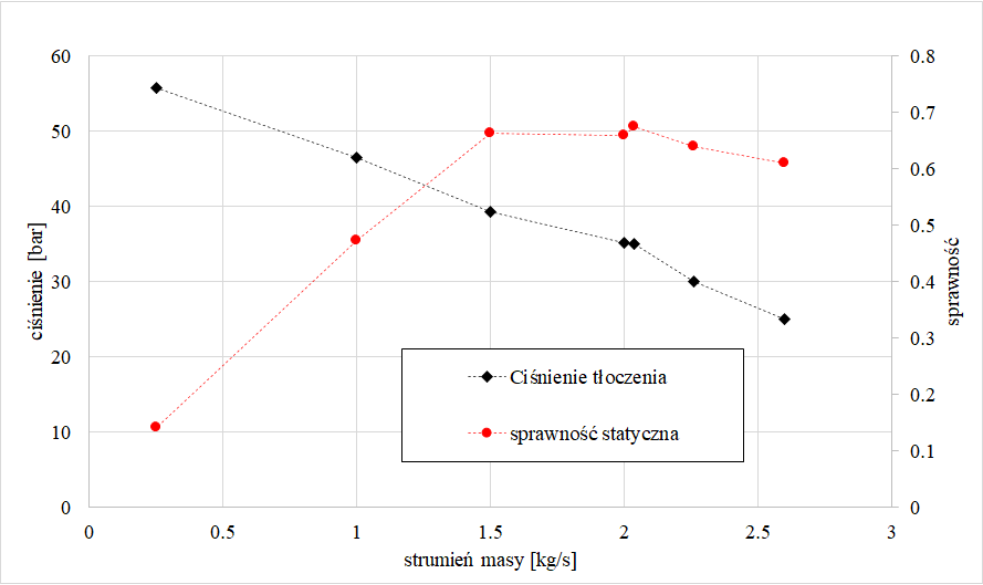
$$F_x = \int_{r_A}^{r_B} p(r) 2\pi r dr = 2\pi \left[\lambda \frac{r_B^2 - r_A^2}{2} + \frac{\rho(\omega\alpha)^2 (r_B^4 - r_A^4)}{8} \right] \tag{7}$$

gdzie:

$$\lambda = p_A - \rho \frac{(r_A \omega\alpha)^2}{2} \tag{8}$$

Poza wymiarami promieniowymi oraz ilościami przewężeń uszczelnień labiryntowych, parametrem determinującym zachowanie układu balansowania sił osiowych jest sumaryczny luz osiowy wirnika – h_{sum}. Jest to suma luzów uszczelnienia pomiędzy punktami 1-2 i uszczelnienia pomiędzy punktami 3 i 4. Wirnik łożyskowany jest w taki sposób, by dopuszczalny był jego ruch osiowy w zakresie wspomnianego luzu sumarycznego, dzięki czemu przy odpowiednim doborze promieni i ilości stopni uszczelnień, położenie równowagi (bilansowania się sił osiowych) będzie dla położenia wirnika zawartego pomiędzy uszczelnieniami.

Warunkiem brzegowym dla układu balansującego, jest charakterystyka pompy, determinująca różnice ciśnień pomiędzy punktami 1,a 4 jako funkcję prędkości obrotowej i strumienia masy tłoczonego przez pompę. Wyznaczoną numerycznie charakterystykę pompy, dla której projektowany jest wspomniany układ przedstawia Rys. 4.



Rys. 4. Charakterystyka pompy promieniowej dla której projektowany jest układ balansujący [Kutnik i Ziegler, 2021]

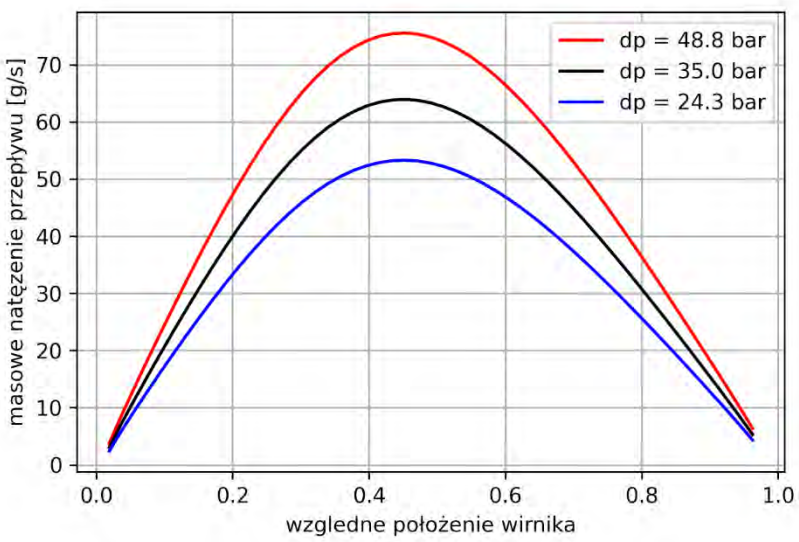
Drugim warunkiem prawidłowej pracy systemu, jest stateczność położenia osiowego wirnika. Warunkiem stateczności jest ujemna pierwsza pochodna wypadkowej siły osiowej działającej na wirnik w otoczeniu punktu równowagi.

$$\frac{\partial F_x}{\partial x_{wirnika}} < 0 \tag{9}$$

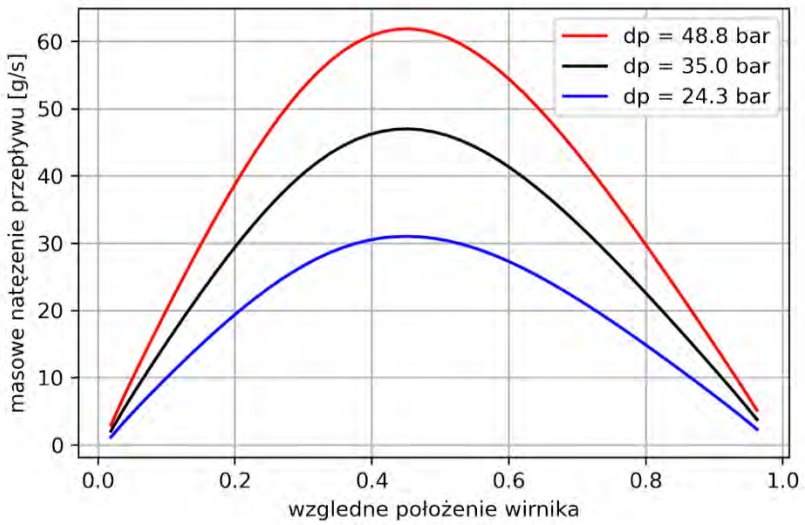
Obliczenia analityczne wykonano dla konfiguracji geometrycznej o następujących wymiarach promieniowych r_1 do r_4 odpowiednio 14mm, 18mm, 7.5mm, 6.5mm. Sumaryczny luz osiowy $h_{sum} = 0{,}1$mm. Współczynnik przepływu dla uszczelnień labiryntowych przyjęto jako $C_D = 0{,}55$ na podstawie NASA SP-8121 [Burcham i Keller, 1978].

Dla tak dobranych parametrów wykonano analityczne obliczenia przepływów i sił oddziałujących na wirnik pompy, a ich wyniki przedstawiają wykresy na rysunkach 5 do 8. Jak widać w obu przypadkach maksimum przecieku następuje gdy wirnik jest mniej więcej w połowie odległości pomiędzy uszczelnieniami. Wartość tego przecieku to zależnie od punktu charakterystyki 30-75 g/s, a więc poniżej 3% nominalnego strumienia pompy. Dodatkowo wykresy na Rys. 7 i 8 pokazują, że zarówno opcja bez żeber, jak i z żebrami nieruchomymi posiadają położenia równowagi. Dla wersji bez żeber równowaga sił osiowych osiągana jest dla ok. 60% względnego położenia osiowego wirnika (Rys. 8). Wadą tej konfiguracji jest natomiast niewielki zapas możliwej do uzyskania siły, zwłaszcza dla przypadku maksymalnego ciśnienia tłoczenia. Pod tym względem znacznie lepiej zachowuje się przypadek z żebrami odwirowującymi, ponieważ wyhamowanie wirowania strumienia za wirnikiem sprawia, że promieniowy gradient ciśnienia jest tam pomijalnie mały, w efekcie w zależności od wzajemnego położenia wirnika i uszczelnień możliwe jest uzyskanie za wirnikiem pełnego przedziału od ciśnienia referencyjnego do ciśnienia tłoczenia. Zastosowanie żeber odwirowujących ma więc tę zaletę, że tworzy z tylnej ściany wirnika łożysko hydrostatyczne o największej amplitudzie możliwych do wygenerowania sił.

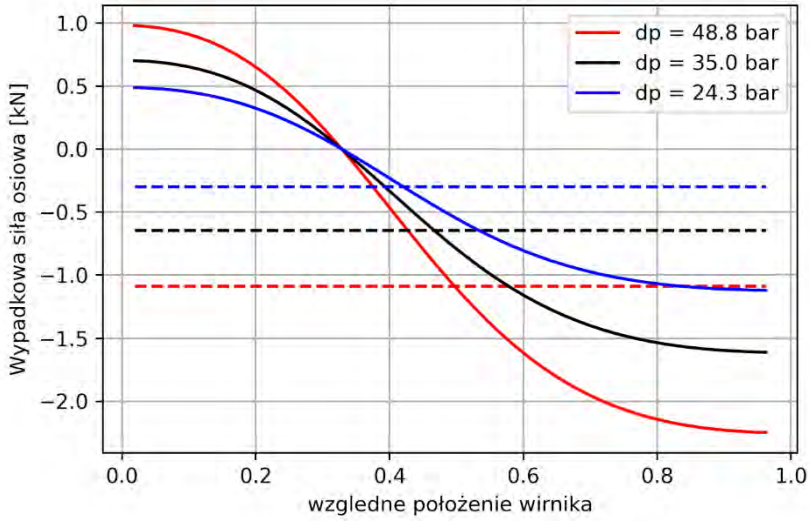
Położenia równowagi dla przypadku z żebrami odwirowującymi znajduje się pomiędzy 40% a 50% względnego osiowego położenia wirnika (Rys. 7). W obu zaprezentowanych przypadkach widać również ujemną pochodną wypadkowej siły po położeniu wirnika co odpowiada spełnieniu warunku stateczności statycznej.



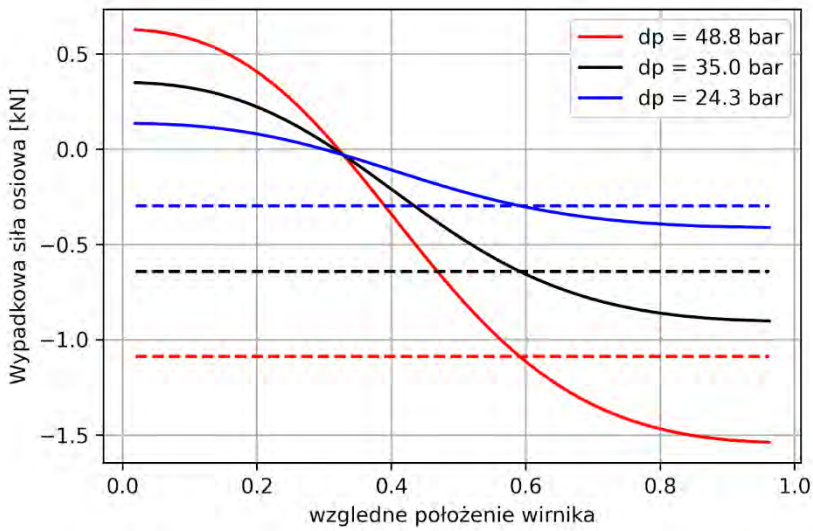
Rys. 5. Masowe natężenie przepływu przez układ uszczelnień, dla przypadku z żebrami odwirowującymi. dp - przyrost ciśnienia statycznego na wirniku pompy



Rys. 6. Masowe natężenie przepływu przez układ uszczelnień, dla przypadku bez żeber. dp - przyrost ciśnienia statycznego na wirniku pompy



Rys. 7. Siły działające osiowo od systemu balansującego (z żebrami nieruchomymi), liniami przerywanymi oznaczono wartości sił równoważące siłę osiową od wirnika pompy



Rys. 8. Siły działające osiowo od systemu balansującego (przypadek bez żeber), liniami przerywanymi oznaczono wartości sił równoważące siłę osiową od wirnika pompy

4. ANALIZA NUMERYCZNA PRZEPŁYWU PRZEZ USZCZELNIENIA

W celu szczegółowego zbadania zachowania się płynu w obszarze systemu balansowania sił osiowych wykonano analizy numeryczne CFD dla przypadków z użebrowaniem odwirowującym i brakiem użebrowania. Analizy te mają na celu nie tylko wykazanie efektów drugorzędowych nieprzewidzianych przez model analityczny, ale także walidacje założeń co do takich parametrów jak, chociażby współczynnik przepływu przez uszczelnienia labiryntowe. Konfiguracja z użebrowaniem zawirowującym została odrzucona na etapie wstępnym, gdyż charakteryzowała ją dodatnia pochodna siły po położeniu wirnika (przypadek anty-stateczny), a także znacznie mniejsza zdolność generowania sił osiowych w porównaniu do pozostałych przypadków.

Na potrzeby przeprowadzenia analizy numerycznej w programie ICEM wykonano siatkę (Rys. 9), z parametrem $y+$ równym 1 w celu precyzyjnego odzwierciedlenia zjawisk przyściennych. Analizy przeprowadzono przy użyciu programu Ansys FLUENT. Skorzystano z warunków brzegowych takich jak:

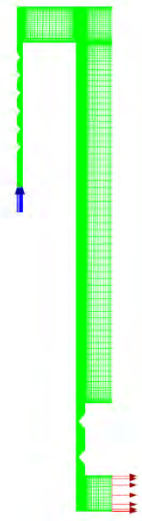
- *Pressure Inlet* na wlocie do układu, z zadanym ciśnieniem pomiarowym równym 45 bar,
- *Pressure Outlet* na wylocie z układu, z zadanym ciśnieniem pomiarowym równym 10 bar,

- *Wall* z zadanym parametrem ściany stacjonarnej wykorzystano dla obudowy i obu uszczelnień labiryntowych wykorzystanych w układzie,
- *Wall* z zadanym parametrem ściany poruszającej się, z prędkością obrotową równą 6283 rad/s.

W celu wymuszenia odwirowania płynu w przypadku z użebrowaniem zastosowano dodatkowe źródło pędu obwodowego (zaimplementowane poprzez UDF) narzucającą zadaną prędkość kątową w obszarze za wirnikiem.

Wykorzystano model płynu mający odzwierciedlić parametry pracy przechłodzonego podtlenku azotu (Z powodu wykorzystania N_2O jako utleniacza w rakiecie HEXA 2+ studenckiego zespołu badawczego PUT RocketLab. Turbopompa projektowo spełnia założenia współpracy z silnikiem wspomnianej rakiety.) Płyn charakteryzował się gęstością równą 1050 kg/m^3 i lepkością dynamiczną równą 0,0001325 kg/ms.

Model turbulencji zastosowany w analizie to *SST k - omega,* wybrany z powodu przystosowania do działania z siatkami charakteryzującymi się parametrem $y+$ 1 i rozwiązywania rozkładu prędkości w podwarstwie laminarnej [Menter, 1992].

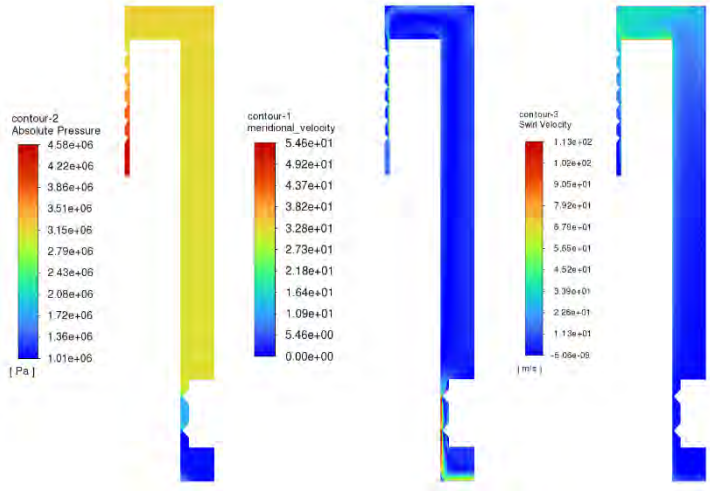


Rys. 9. Wykorzystana siatka strukturalna z oznaczonymi miejscami wlotu i wylotu płynu z układu

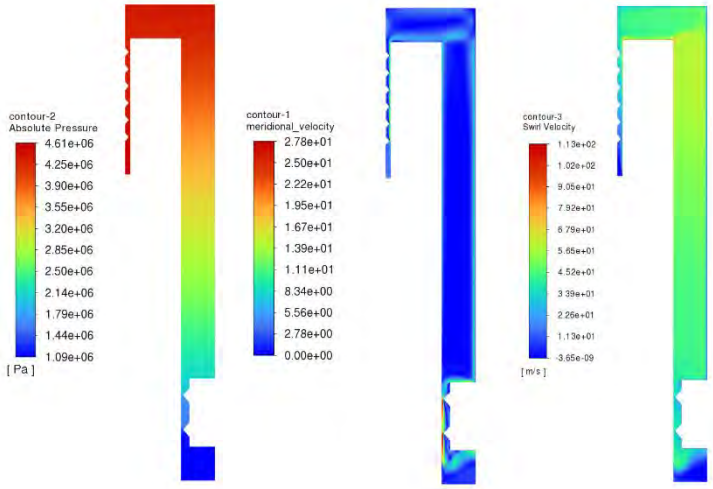
Uzyskane podczas analizy CFD pola przepływowe (Rys. 10) pokazują, iż konfiguracja wykorzystująca żebra nieruchome w połączeniu z zestawem uszczelnień labiryntowych spełnia założenia projektowe. Uszczelnienia labiryntowe generują straty ciśnienia w przepływie utleniacza za wirnik, a także zmniejszają natężenie masowe przecieku prowadzonego ponownie na wlot pompy. Pole przepływowe wi-

doczne na Rys. 10 potwierdza zakładane działanie żeber nieruchomych-ograniczających prędkość zawirowania przepływu w kanale za wirnikowym niemal do wartości równych zeru. Niewirujący płyn zapewnia jednolity rozkład ciśnienia w obszarze za wirnikiem i zapas reakcyjnej siły osiowej.

Pola przepływowe będące wynikiem analizy przypadku bez użebrowań (Rys. 11) pokazują, zgodnie z przewidywaniami promieniowy gradient ciśnienia za tylną ścianą wirnika. Ze względu na powstały od zawirowania płynu (będącego wynikiem tarcia utleniacza o ściankę wirnika) gradient ciśnienia, zmniejszone są różnice ciśnień na uszczelnieniach. Prowadzi to do zmniejszenia masowego przecieku niemal dwukrotnie w odniesieniu do przypadku z żebrami odwirowującymi (Tab. 1). Rozwiązanie tego typu zmniejsza jednak również siłę naporu działającą na tył wirnika, gdyż występowanie promieniowego gradientu ciśnienia zmniejsza wartość średniego ciśnienia oddziałującego na tylną ścianę wirnika.



Rys. 10. Pola ciśnienia absolutnego, prędkości merydionalnej i prędkości zawirowania dla przypadku z żebrami odwirowującymi



Rys. 11 Pola ciśnienia absolutnego, prędkości merydionalnej i prędkości zawirowania dla przypadku bez żeber.

5. PODSUMOWANIE

Bazując na przeglądzie literaturowym wykorzystywanych rozwiązań można stwierdzić, iż jednym z najważniejszych zadań projektowych podczas opracowywania aktywnego systemu redukcji sił osiowych oddziaływujących na układ wirnikowy jest możliwość adaptacji systemu do aktualnych warunków pracy pompy. Trudność w przewidzeniu sił generowanych przez napór płynu dla całego możliwego zakresu działania pompy [Scheer, Viteri, Farquhar, 1978] lub turbiny promuje rozwiązania hydrodynamiczne, dla których siły reakcji są zależne od położenia wirnika i zachowują się w taki sposób, by dążyć do stanu równowagi.

Po przeprowadzeniu serii analiz numerycznych można stwierdzić, iż opracowany model analityczny mimo niedokładności widocznych w porównaniu (Tab. 1) jest cennym narzędziem projektowym. Ułatwia wstępną ocenę zasadności wykorzystania danego rozwiązania, będąc jednocześnie bardzo wydajnym czasowo i ekonomicznie. Niedokładności w szacowaniu rozkładu ciśnienia i tym samym sił działających na wirnik, są największe dla przypadku bez żeber. Sugeruje to, że uznane za drugorzędowe efekty odgrywają znaczną rolę w determinacji rozkładu ciśnień (wprowadzony wraz z przeciekiem moment pędu sprawia, że wypadkowe α dla tego przypadku jest znacząco większe niż 0,5). Niedoszacowanie wartości przecieku przez model analityczny wskazuje na założenie zdecydowanie zbyt niskich C_D. Dogłębna analiza wyników CFD wskazuje, że odległości między kolejnymi przewężeniami jest na tyle mała, iż nie dochodzi do całkowitej dyssypacji pędu w obszarach

pomiędzy przewężeniami. Jako narzędzie oceny jakościowej, przedstawiony model analityczny jest zdecydowanie pomocny, pomagając oszacować zasadności i względne relacje pomiędzy różnymi rozwiązaniami, ustalić wymagane parametry dławików, a także sumaryczny luz wierzchołkowy panujący między nimi. Oszacowano również prawdopodobne natężenia masowe przecieku dla wspomnianych luzów wierzchołkowych.

Tabela 1

Porównanie parametrów przewidywanych przy pomocy modelu analitycznego z wynikiem uzyskanym poprzez analizy numeryczne.

Model/ CFD	Przypadek	Strumień masy przecieku	Siła parcia
		[kg/s]	[N]
CFD	Żebra nieruchome	0,105	667
	Bez żeber	0,054	548
Model	Żebra nieruchome	0,064	427
	Bez żeber	0,047	261

Ze względu na wspomniane wymaganie adaptacyjności systemu w zależności od parametrów generowanych w danej chwili przez układ wirnikowy (sił obciążających osiowo łożyskowanie) w procesie projektowo-analitycznym wybrano układ składający się z dwóch dławików. Dławiki zostały umiejscowione na początku i końcu kanału przepływowego determinującego przeciek z wylotu pompy, za wirnik, a następnie na wlot pompy. Dodatkowo w celu zwiększenia możliwej do wygenerowania siły osiowej odciążającej łożyskowanie wykorzystano również żebra odciążające. Zapas potencjału generowanych sił zwiększa szanse na ciągłą pracę systemu bez obciążeń osiowych w łożyskach i zmniejsza ryzyko wpadnięcia w ciągłe oscylacje osiowe stanowiące zagrożenie dla pracy turbopompy [Scheer, Viteri, Farquhar, 1978].

LITERATURA

1. Burcham R. E., Keller R. B. Jr., 1978, Liquid Rocket Engine Turbopump Rotating-shaft Seals, NASA SP-8121
2. Furst R. B., Keller R. B. Jr., 1973, Liquid Rocket Engine Centrifugal Flow Turbopumps, NASA SP-8109
3. Kutnik K., Ziegler B., 2021, Projekt Przepływowy Odśrodkowego Wirnika Dla Turbopompy Silnika Rakietowego, praca dyplomowa magisterska

4. Menter, F.R., 1992. Improved two-equation k-omega turbulence models for aerodynamic flows (No. A-92183)
5. Scheer D. D., Viteri F., Farquhar J., 1978 Liquid Rocket Engine Axial-Flow Turbopumps, NASA SP-8125

Design and Analyses of Axial Thrust Balance System on Rocket Engine's Turbopump Impeller

The article presents the design and analysis of a system for balancing axial forces acting on the rotor of a rocket engine turbopump. Based on known methods, feasible options were selected. In order to facilitate the selection of the appropriate option, an analytical model indicating the approximate validity of the given solutions was developed, and then the results obtained using it were compared with CFD numerical analyses. The result of the work is a proposed solution to the problem of balancing axial forces on the rotor in a turbopump built by the PUT RocketLab student research team.

Keywords: Turbopump, Axial Thrust Balance, CFD

Marta GALANT-GOŁĘBIEWSKA *
Zuzanna KRĘC*
Marta MACIEJEWSKA*
Barbara MIKA*

ANALIZA RYZYKA I PRZYCZYN ZDARZEŃ LOTNICZYCH W RÓŻNYCH SEKTORACH BRANŻY LOTNICZEJ W POLSCE

W dobie rozwoju technologicznego oraz coraz większej dostępności transportu lotniczego rośnie zainteresowanie branżą lotniczą, zarówno w kontekście środka transportu o stosunkowo krótkim czasie podróży, jak i w kontekście lotów prywatnych, widokowych, czy sportowych. Niniejszy artykuł dąży do porównania poważniejszych zdarzeń lotniczych w sektorach zarobkowego transportu lotniczego (ang. *Commercial Air Transport*, CAT) oraz lotnictwa ogólnego (ang. *General Aviation*, GA) w Polsce. W analizach uwzględniono zarówno czas sprzed pandemii COVID-19, jak również jej wpływ na liczbę rejestrowanych zdarzeń niepożądanych.

Aby uzyskać obraz przedstawiający stosunek liczby zdarzeń oraz ich dotkliwość pomiędzy sektorami GA i CAT, a także przedstawić liczbowo najczęstsze przyczyny zdarzeń lotniczych dokonano analizy raportów zdarzeń lotniczych w Polsce w latach 2015-2020. Przeprowadzono analizę zdarzeń lotniczych sklasyfikowanych jako poważne incydenty oraz wypadki. W celu porównania wytypowanych zdarzeń poddano je ocenie ryzyka za pomocą metody MICE-RISK. Dla każdego ze zdarzeń przypisano wartości kryteriów i obliczono poziom ryzyka. Następnie wartościowano i kwalifikowano ryzyko zgodnie z przyjętą metodyką. W kolejnym etapie przeanalizowano przyczyny omawianych zdarzeń.

Analizy wykazały, iż istotnym jest rozdzielenie rodzajów lotnictwa w globalnych analizach ryzyka w polskim lotnictwie. Z 97 wypadków i poważnych incydentów zarejestrowanych w latach 2015-2020, tylko dwa miały miejsce w sektorze CAT. Dodatkowo, w lotnictwie ogólnym zidentyfikowano zdecydowanie wyższy poziom ryzyka w weryfikowanych zdarzeniach.

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo lotnicze, analiza ryzyka, lotnictwo ogólne, lotnictwo komercyjne

* Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Napędów, Zakład Lotnictwa

1. WPROWADZENIE

W dobie rozwoju technologicznego oraz coraz większej dostępności transportu lotniczego rośnie zainteresowanie branżą lotniczą, zarówno w kontekście środka transportu o stosunkowo krótkim czasie podróży, jak i w kontekście lotów prywatnych, widokowych, czy sportowych. Takowy wzrost pośrednio wpływa też na zwiększenie się liczby źródeł zagrożeń w przewozie lotniczym. Większe zatłoczenie dróg lotniczych, czy lotnisk to zwiększone obciążenie dla obsługi naziemej czy kontrolerów ruchu lotniczego. Zwiększone zainteresowanie sportem, czy możliwością zdobycia licencji to zwielokrotniony nakład pracy dla instruktorów. Mnogość podróżujących to zwiększona liczba operacji, które muszą być odpowiednio zaplanowane. Same maszyny, czy urządzenia też są znacznie bardziej obciążone, ze względu na zwiększoną liczbę godzin pracy, do których są wykorzystywane, co zwiększa ryzyko ich zniszczenia przez uszkodzenie się nadmiernie zużytych części. Coraz powszechniejsze stają się bezzałogowe statki powietrzne, których ruch może stanowić bardzo duże, wcześniej nieznane, źródło zagrożeń, na które piloci, zarówno ci z większym, jak i ci z mniejszym doświadczeniem, mogą nie być dostatecznie przygotowani. Należy wziąć pod uwagę również zmiany spowodowane przez pandemię wirusa COVID-19, która wpłynęła na zmiany w trybie oraz sposobie pracy na wielu stanowiskach. Stąd też zwiększenie liczby zdarzeń lotniczych. Liczba zdarzeń, jak i straty, które powodują mogą być różne w zależności od grupy lotnictwa, których zdarzenia dotyczą. Niniejszy artykuł dąży do porównania poważniejszych zdarzeń lotniczych w sektorach zarobkowego transportu lotniczego (CAT) oraz lotnictwa ogólnego (GA).

2. PROBLEM BADAWCZY I METODA BADAWCZA

Współcześnie u samych podstaw lotnictwo zostało prawnie podzielone na lotnictwo cywilne i lotnictwo państwowe. Lotnictwo cywilne składa się z lotnictwa komunikacyjnego, zwanego również zarobkowym transportem lotniczym(CAT) , oraz lotnictwa ogólnego (GA). Zgodnie z [Ustawa Prawo Lotnicze 3 lipca 2002] "Lotnictwo cywilne obejmuje wszystkie rodzaje lotnictwa, z wyjątkiem lotnictwa państwowego, to jest państwowych statków powietrznych, załóg tych statków oraz lotnisk państwowych wykorzystywanych wyłącznie do startów i lądowań państwowych statków powietrznych."

Podział ten jest niezwykle ważny gdyż obowiązująca Konwencja Chicagowska [Dziennik Ustaw Nr 35, poz. 212, 1959] z 1944 roku o międzynarodowym lotnictwie cywilnym jest stosowana głównie w przypadku cywilnych statków powietrznych, jej zawartość jednak nie obowiązuje w pełni państwowych statków powietrznych.

Lotnictwo komunikacyjneto uporządkowany transport lotniczy mający na celu przewóz osób lub towarów, gdzie loty odbywają się planowo według wcześniej ustalonego rozkładu [Bujanowski 2016]. Stąd też podział na lotnictwo pasażerskie i lotnictwo towarowe. Lotnictwo pasażerskie można również skategoryzować wewnętrznie w zależności od długości lotu lub regularności odbywania lotu. Natomiast lotnictwo towarowe możliwe jest do podziału na lotnictwo pocztowe oraz przewóz towarów tzw. cargo. Lotnictwo ogólne obejmuje loty które nie podążają za wcześniej ustalonym konkretnym i powtarzanym rozkładem. Składać się mogą na nie loty prywatne w różnych celach np. sportowych. Przedstawiony podział jest prosty i intuicyjny. Pomiędzy lotnictwem komunikacyjnym, a lotnictwem ogólnym występują znaczne różnice [Galant 2019]. W lotnictwie ogólnym proces szkolenia jest krótszy i mniej skomplikowany oraz stanowi podstawę do rozpoczęcia nauki, jako uczeń-pilot w lotnictwie komunikacyjnym, gdzie przyszły personel lotniczy potrzebuje znacznie więcej doświadczenia i odbytych zajęć. W celu dokonania analizy zdarzeń lotniczych w Polsce, na początku postanowono skupic się na modelach, wspomagających określanie przyczyn zdarzeń niepożądanych. W celu ułatwienia identyfikacji źródeł zagrożeń, a także poznania przyczyn wypadków lotniczych stosowane jest wiele różnych modeli takich jak model 4M, model 5M, czy model SHELL. Model SHEL został opracowany w 1972 roku przez E. Edwardsa, zaś uzupełniony do formy SHELL znanej dzisiaj został przez Hawkinsa w 1975 roku [Klich 2011, Pietrzak 2012]. W modelu SHELL skupiono się na interakcji między czynnikiem ludzkim, a pozostałymi elementami modelu, gdyż ze względu na rozwój technologii lotniczych to właśnie element ludzki jest typowany jako ten najbardziej wadliwy, będący źródłem wypadków.

Nazwa modelu powstała poprzez dobranie pierwszych liter jego poszczególnych elementów [Klich 2011]:

- S (ang. Software) – niematerialne elementy systemu – przepisy, prawa, opracowane na ich podstawie procedury,
- H (ang. Hardware) – maszyna (statek powietrzny) oraz inne urządzenia – stan techniczny statku, urządzenia wspomagające lot, stan techniczny układów i organów sterowania, nie wykryte wady, a także wszelkie systemy techniczne wykorzystywane do zabezpieczenia lotu,
- E (ang. Environment) – środowisko – obiektywne otoczenie w którym znajduje się statek powietrzny i jego załoga,
- L (ang. Liveware) – czynnik ludzki (pierwotnie znajdujący się w modelu przy opracowaniu) – operator statku lotniczego, jego cechy charakteru, stan zdrowia, stan psychiczny itd.,
- L (ang. Liveware) – czynnik ludzki (dodany w uzupełnieniu) – ludzie nienależący do załogi lotniczej, ale mogący mieć pośredni lub bezpośredni wpływ na lot i jego bezpieczeństwo.

Na potrzeby tego artykułu przyjęto następującą klasyfikację przyczyn wypadków i incydentów lotniczych opracowaną na podstawie modelu SHELL. Każdy wypadek lub incydent można przypisać do co najmniej jednej kategorii przyczyn:

− Środowisko – gdy przyczyna wypadku lub incydentu miała bezpośredni związek z otoczeniem statku powietrznego lub załogi,
− Czynnik ludzki – gdy przyczyna wypadku lub incydentu była bezpośrednio związana z błędem ludzki, zarówno mając na uwadzę załogę, jak i pozostałych ludzi mogących mieć wpływ na bezpieczeństwo lotu,
− Czynnik techniczny – gdy przyczyna wypadku lub incydentu była bezpośrednio związana z uszkodzeniem mechanicznym statku powietrznego lub innych urządzeń wspomagających lot, a także błędów i nieścisłości praw, czy procedur.

W Polsce na poziomie krajowym raportowanie o stanie bezpieczeństwa należy do zadań Urzędu Lotnictwa Cywilnego (ULC). Urząd tworzy 4-letnie plany zwane Krajowymi Planami Bezpieczeństwa (KPB), które są załącznikiem do Krajowego Programu Bezpieczeństwa w Lotnictwie Cywilnym (KPBwLC). Jest to narzędzie służące do zarządzania ryzykiem, zatem identyfikacji zagrożeń, ich oceny oraz wykonaniem działań mających na celu ich redukcję. Krajowy Plan Bezpieczeństwa jest elementem dokumentu obejmującego obszar Europy, czyli Europejskiego Planu Bezpieczeństwa Lotniczego (EPAS), a także opiera się na Regionalnym Planie Bezpieczeństwa Lotniczego RASP (ang. *Regional Aviation Safety Plan*) [ULC 2021]. Główna część KPB składa się z trzech rozdziałów. W każdym z nich skupiono się na innym obszarze zagrożeń. Pierwszy rozdział to obszar zagrożeń systemowych, związanych z systemem nadzoru nad organizacjami lotniczymi. Przykładowo w czasie pandemii COVID-19 w ramach tego rozdziału został przeanalizowany jej wpływ na prowadzenie bieżącego nadzoru. Drugi rozdział to obszar zagrożeń europejskich, opracowany na podstawie wcześniej wspomnianych dokumentów jak EPAS i EUR-RASP (ang. *European Regional Aviation Safety Plan*). Do tych obszarów zagrożeń zaliczane są między innymi: wtargnięcie na drogi startowe, nieprawidłowy kontakt z drogą startową, utrata kontroli podczas lotu itd. Trzeci rozdział to obszar zagrożeń krajowych, który jest opracowywany na podstawie analiz wewnętrznych. Do obszarów zagrożeń krajowych należą: zagrożenia ze strony zwierząt, zdarzenia na śmigłowcach, zdarzenia związane z holowaniem szybowca [ULC 2021]. Tak jak w Polsce za opracowanie Krajowego Planu Bezpieczeństwa odpowiada ULC, tak za opracowanie Europejskiego Planu Bezpieczeństwa Lotniczego odpowiada Agencja Unii Europejskiej ds. Bezpieczeństwa Lotniczego (ang. *European Union Aviation Safety Agency*, EASA). EPAS w odróżnieniu od KPB jest planem 5-letnim [EASA 2020]. Ze względu na różnorodność i szeroką możliwość wyboru definicji ryzyka możliwe jest zdefiniowanie go na wiele możliwych sposobów, w zależności od używanej metody wyznaczania ryzyka. W ramach artykułu, ryzyko zostanie zdefiniowane jako kombinacja prawdopodobieństwa wystąpienia zagrożenia i szkód spowodowanych jego wystąpieniem [Chruzik i Felner 2015]. W celu wyznaczenia ryzyka wykorzystano metodę MICE-RISK [Galant 2017, Galant 2018]. W metodzie tej założono, że ryzyko to suma trzech poszczególnych wartości:
− prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia niepożądanego,
− poziomu strat określonych liczbą ofiar zdarzenia,
− poziomu strat określonych za pomocą start materialnych.

Zależność według której wyznaczana jest wartość ryzyka w wyżej wymienionej metodzie to:

$$R = 3*K1 + 2*K2 + 2*K3 \quad (1)$$

gdzie:

K1 - prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku,

K2 - poziom wielkości strat określony w złotówkach,

K3 - poziom wielkości strat określony liczbą ofiar.

Każdy z parametrów tej metody zostaje oszacowany poprzez przypisanie im wartości na podstawie ustalonej skali. Wartości wyżej wymienionych wskaźników zostały przedstawione tabelach 1-3.

Tabela 1

Schemat kwantyfikacji poziomów K1 – prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia wypadkowego w metodzie MICE-RISK [Galant 2017]

Poziom K1	Charakterystyka	Szansa wystąpienia
10	bardzo prawdopodobne	80 %
6	prawdopodobne	40 %
3	mało prawdopodobne, ale możliwe	5 %
1	sporadycznie możliwe	1 %
0,1	teoretycznie możliwe	10-2 %

Tabela 2

Schemat kwantyfikacji poziomów K2 – wielkości strat wyrażony w złotówkach w metodzie MICE-RISK [Galant 2017]

Poziom K2	Charakterystyka	Straty materialne
20	poważny wypadek	> 3 mln zł
10	wypadek	0,3-3 mln zł
5	poważny incydent	30-300 tys. zł
1	incydent	3-30 tys. zł
0,1	zdarzenie lotnicze	< 3 tys. zł

Tabela 3

Schemat kwantyfikacji poziomów K3 – wielkości strat wyrażony w liczbie ofiar w metodzie MICE-RISK [Galant 2017]

Poziom K3	Charakterystyka	Straty materialne
20	poważny wypadek	więcej niż jedna ofiara śmiertelna
10	wypadek	jedna ofiara śmiertelna
5	poważny incydent	ciężkie uszkodzenia ciała
1	incydent	udzielenie pierwszej pomocy
0,1	zdarzenie lotnicze	brak strat w ludziach

Po wyznaczeniu kolejnych parametrów oraz wskaźnika R, ryzyku przypisywana jest konkretna wartość na podstawie wcześniej ustalonej skali, przedstawionej w tabeli 4.

Tabela 4

Schemat kwantyfikacji poziomów ryzyka R w metodzie MICE-RISK [Galant 2017]

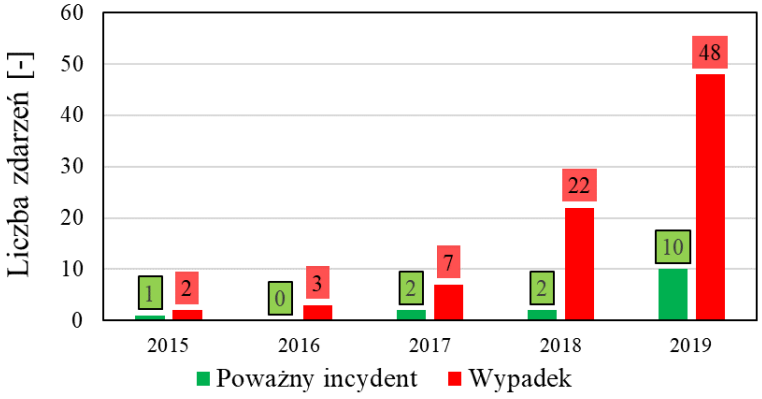
Wartość (R)	Charakterystyka
$R \leq 10$	pomijalne
$10 < R \leq 25$	małe
$25 < R \leq 60$	istotne
$60 < R \leq 85$	duże
$R > 85$	bardzo duże

Gdy zostanie ryzyku przypisana konkretna wartość można je przydzielić do konkretnej kategorii ryzyka:

- akceptowalne (od wartości pomijalnej do małej),
- tolerowane (wartość istotna),
- nieakceptowalne (od wartości dużej w górę).

3. ANALIZA ZDARZEŃ LOTNICZYCH W LATACH 2015-2020

Aby uzyskać obraz przedstawiający stosunek liczby zdarzeń oraz ich dotkliwość pomiędzy sektorami GA i CAT, a także przedstawić liczbowo najczęstsze przyczyny zdarzeń lotniczych dokonano analizy raportów zdarzeń lotniczych w Polsce w latach 2015-2020 [PKBWL, 2021]. Przeprowadzono analizę zdarzeń lotniczych sklasyfikowanych jako poważne incydenty oraz wypadki.



Rys. 1. Liczba zdarzeń lotniczych w Polsce, w latach 2015-2020 [opracowanie własne]

Z dostępnych raportów końcowych uzyskano następujące wyniki: w latach 2015-2020 miało miejsce 97 zdarzeń lotniczych zakwalifikowanych jako poważne incydenty lub wypadki. Liczba zdarzeń zakwalifikowanych jako wypadki każdego badanego roku była większa, niż liczba zdarzeń zakwalifikowanych jako poważne incydenty.

Dla lepszego przedstawienia sytuacji na rysunku 1 znjaduje się liczba poważnych incydentów oraz liczba wypadków kolejno dla lat 2015-2020.

Prawie 100% przypadków należało do zdarzeń przypadających do sektora GA. Z 97 badanych zdarzeń jedynie 2 z nich miały miejsce w sektorze CAT. Wynika z tego, że w zaokrągleniu zdarzenia należące do sektora CAT stanowiły nie więcej niż 2% wszystkich badanych zdarzeń. Należy dodać, iż dwa przypadki zdarzeń lotniczych należące do sektora CAT był poważnymi incydentami, żaden zaś nie został sklasyfikowany jako wypadek.

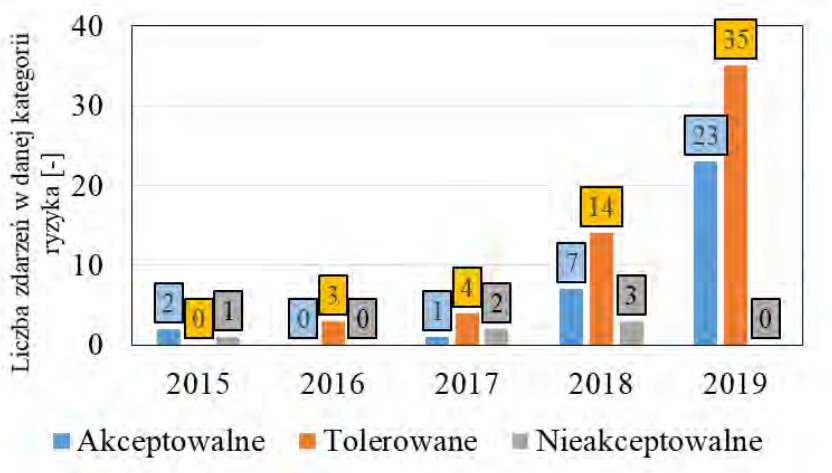
Dla wszystkich analizowanych zdarzeń lotniczych dokonano wyznaczenia ryzyka z użyciem metody MICE-RISK. Każdemu zdarzeniu osobno przypisano trzy parametry na podstawie których wyznaczono wskaźnik ryzyka R, a następnie przydzielono każdemu zdarzeniu odpowiednią kategorię ryzyka. Pierwszym przypisywanym parametrem było prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku. Określano je na podstawie analizy czynników mogących doprowadzić do wypadku. Prawdopodobieństwo popełnienia błędu przez pilota dopiero odbywającego szkolenie jest większe niż pilota z doświadczeniem w postaci wielu godzin nalotu. Doświadczonemu pilotowi łatwiej jest popełnić błąd jeśli posługuje się urządzeniami, z którym nie jest aż tak dobrze zapoznanym np. nowy typ skrzydła paralotni. Wykorzystywanie elementów zastępczych niepolecanych lub nie produkowanych przez producenta sprzętu również zwiększa prawdopodobieństwo wypadku. Mając na uwadze tego rodzaju czynniki przypisano odpowiednie prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku. Drugim wyznaczonym parametrem była wielkości strat określona w złotówkach. Z analizowanych raportów odczytano informacje o poziomie zniszczeń statku powietrznego oraz sprzętu, czy uszkodzeniu uległy tylko konkretny element, czy też cały statek powietrzny. Następnie na podstawie dostępnych danych rynkowych oszacowano wielkość straty w złotówkach. Dodatkowo obliczono również straty spowodowane przez zdarzenie, takie jak uszkodzenia linii elektrycznych, znaków drogowych, dróg publicznych, czy też budynków. Ostatnim przypisywanym parametrem była wielkości strat wyrażona w liczbie ofiar. W raportach jasno określona jest liczba ofiar lub rodzaj obrażeń jakie uczestniczący w zdarzeniu odnieśli. Można zatem bez problemu odczytać liczbę ofiar śmiertelnych, liczbę ludzi którzy odnieśli obrażenia poważne lub lekkie, a także liczbę uczestników którzy nie odnieśli żadnych obrażeń. Przykłady przypisania wartości parametrom, obliczoną wartość ryzyka oraz wyznaczoną na ich podstawie kategorie ryzyka przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5

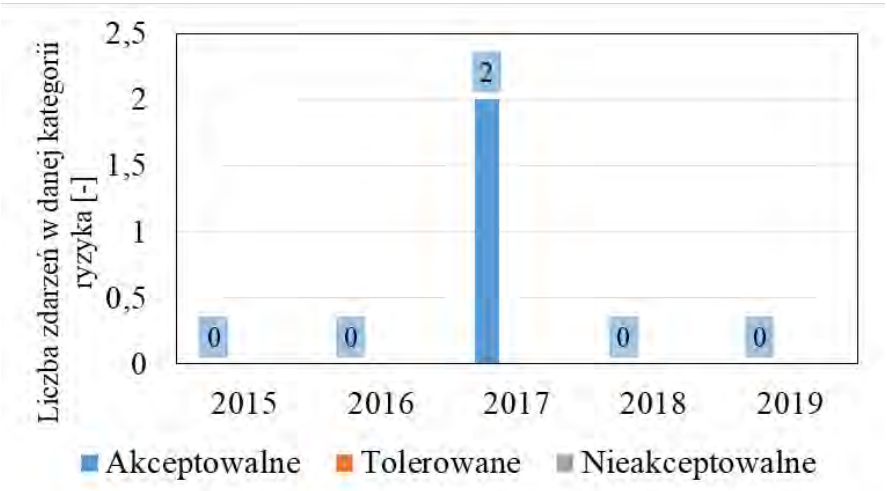
Wyznaczenie ryzyka z użyciem metody MICE-RISK dla zdarzeń lotniczych w 2017 roku [opracowanie własne]

Lp.	Typ zdarzenia	Sektor	K1	K2	K3	Wartość ryzyka	Kategoria ryzyka
1	Wypadek	GA	6	5	20	68	Nieakcpetowalne
2	Wypadek	GA	6	5	5	38	Tolerowane
3	Wypadek	GA	6	5	0,1	28,2	Tolerowane
4	Wypadek	GA	6	5	10	48	Tolerowane
5	Wypadek	GA	3	5	0,1	19,2	Akceptowalne
6	Wypadek	GA	10	1	20	72	Nieakcpetowalne
7	Poważny incydent	CAT	3	5	0,1	19,2	Akceptowalne
8	Poważny incydent	CAT	3	5	0,1	19,2	Akceptowalne
9	Wypadek	GA	6	5	5	38	Tolerowane

W taki sam sposób wyznaczono wartość ryzyka dla lat 2015-2020. Jak przedstawiono wcześniej zdarzeń lotniczych w sektorze GA jest znacznie więcej niż w sektorze CAT. Różnica pojawia się też w poziomie ryzyka, co wpływa rónwież na kategorię ryzyka dla dwóch różnych sektorów. W sektorze GA zdarzenia lotnicze należały na przestrzeni lat do każdej kategorii ryzyka, od akceptowalnego, przez tolerowane, do nieakceptowalnego. Natomiast dwa przypadki należące do sektora CAT nie osiągnęły wartości ryzyka na tyle dużej, aby zostało zakwalifikowane inaczej niż akceptowalne. Zobrazowane wyniki wyznaczenia ryzyka przedstawiono na rysunkach 2 i 3.

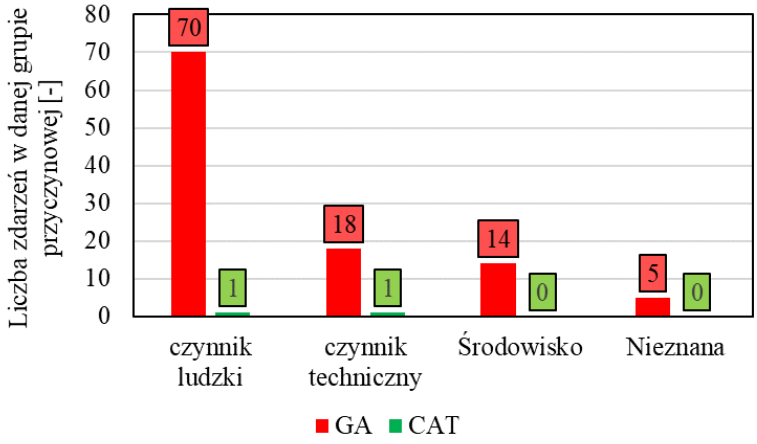


Rys. 2. Kategorie ryzyka obliczonego dla zdarzeń w GA [opracowanie własne]



Rys. 3. Kategorie ryzyka obliczone dla zdarzeń w CAT [opracowanie własne]

Na podstawie dostępnych raportów przeprowadzono też analizę przyczyn zdarzeń lotniczych, aby móc ustalić czynnik najbardziej wpływających na poziom ryzyka. Wyniki analizy przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Liczba zdarzeń w danej grupie przyczynowej [opracowanie własne]

Jednoznacznie można stwierdzić, iż najczęstszą przyczyną zdarzeń lotniczych jest czynnik ludzki na który przypadały nie tylko błędy pilota popełnione podczas danej fazy lotu, ale też niepoprawne przygotowanie się do lotu, nieprzestrzeganie przepisów prawa, czy też ignorowanie ostrzeżeń o złych warunkach pogodowych.

Drugim najczęstszym źródłem zdarzeń lotniczych jest czynnik techniczny, na który składają się: użycie części zamiennych pochodzących z nietestowanych źródeł, zużycie zmęczeniowe części, wady konstrukcyjne itp. Niemal równie często co czynnik techniczny powodem zdarzeń było środowisko. Czynniki środowiskowe to między innymi niespodziewane podmuchy wiatru, nagłe zmiany pogody i duże przeciążenie pilota pracą.

4. WNIOSKI I PODSUMOWANIE

Po dokonaniu analizy na podstawie raportów dostępnych na stronach Państwowej Komisji Badania Wypadków Lotniczych można uznać, iż w sektorze lotnictwa ogólnego dochodzi do większej liczby zdarzeń lotniczych o klasyfikacji poważnego incydentu lub wypadku. W 70% przypadków przyczyną tych zdarzeń był czynnik ludzki, na który składał się błąd pilota spowodowany niedostatecznym doświadczeniem lub zbyt późną reakcją osoby nadzorującej szkolenie. Czynnik techniczny jako druga najczęstsza przyczyna zdarzeń lotniczych w sektorze GA również był powiązany z działaniem czynnika ludzkiego, takim jak wymiana oryginalnej zagubionej części, częścią nieznanego pochodzenia. Ze względu na liczbę odbywających się operacji w sektorze GA ciężko jest prowadzić nad nimi szczególny nadzór i kontrolę. Dodatkowo należy wziąć pod uwagę, iż do lotów GA należą też loty szkoleniowe. Częstą przyczyną zdarzeń było niewystarczające doświadczenie pilota, co można zminimalizować jedynie treningiem, przyjmując tym samym do świadomości możliwość wypadku. Możliwą opcją zmniejszenia ryzyka poważnych incydentów i wypadków w sektorze GA, gdzie istnieje największe zagrożenie, jest rozwój szkoleń w bezpiecznych warunkach symulatorowych, do tego stopnia aby nie były one mniej skuteczne niż szkolenia terenowe.

LITERATURA

1. Bujanowski M.: Civil aviation safety. Scientific Publisher SCHOLAR, Warsaw 2016
2. Chruzik K., Fellner A., Zarządzanie ryzykiem w transporcie. Logistyka, 4, 2015, 7311-7320.
3. E.Klich, Bezpieczeństwo Lotów w Transporcie Lotniczym, Radom, 2011
4. Galant M., Markisz J., Kardach M., Maciejewska M., Diversification of aviation safety management on the basis of differences between GA and CAT, Journal of Konbin - 2019, vol. 49, no. 2, s. 139-160
5. Galant M.: Analysis of the possibilities of increasing safety in general aviation through the use of new technologies. 5th Polish scientific and technical conference „Safety and reliability in aviation and development of aviation in regions", Radom 2018.
6. https://pkbwl.gov.pl/index.php/raporty
7. https://www.easa.europa.eu/domains/safety-management/european-plan-aviation-safety

8. https://www.ulc.gov.pl/pl/zarzadzanie-bezpieczenstwem/program-bezpieczenstwa-w-lotnictwie-cywilnym/krajowy-plan-bezpieczenstwa/5656-krajowy-plan-bezpieczenstwa-2021-2024
9. Jacyna-Gołda I., Gołębiowski P., Izdebski M., Kłodawski M., Jachimowski R., Szczepański E.: The evaluation of the sustainable transport system development with the scenario analyses procedure. Journal of Vibroengineering, Vol. 19, No. 7, 2017.
10. Konwencja o międzynarodowym lotnictwie cywilnym, Chicago 7 grudnia 1944 r. (Dz.U. z 1959 r. Nr 35, poz. 212, z późn. zm)
11. M. Pietrzak, Przedmiot i obszar badań lotnictwa a obronność, OBRONNOŚĆ. Zeszyty Naukowe 2/2012
12. M.Galant, Ograniczanie ryzyka zagrożeń w lotnictwie ogólnym przez zastosowaniesystemu monitorującego stan psychofizyczny pilota, 2017
13. Ustawa Prawo Lotnicze z dnia 3 lipca 2002 r. (z późn. zm.)

ANALYSIS OF THE RISK AND CAUSES OF AVIATION INCIDENTS IN VARIOUS SECTORS OF THE POLAND AVIATION INDUSTRY

Abstract

In the era of technological development and the increasing availability of air transport, interest in the aviation industry is growing, both in the context of a means of transport with a relatively short travel time, and in the context of private, sightseeing or sports flights. This article aims to compare major aviation incidents in the Commercial Air Transport (CAT) and General Aviation (GA) sectors in Poland. The analyzes took into account both the time before the COVID-19 pandemic and its impact on the number of recorded adverse events. In order to obtain an image showing the ratio of the number of incidents and their severity between the GA and CAT sectors, as well as to present numerically the most common causes of aviation incidents, an analysis of aviation incident reports in Poland in 2015-2020 was performed. An analysis of aviation events classified as serious incidents and accidents was carried out. In order to compare the selected events, they were subject to risk assessment using the MICE-RISK method. Criteria values were assigned for each event and the risk level was calculated. Then, the risk was assessed and classified in accordance with the adopted methodology. In the next stage, the causes of the discussed events were analyzed.The analyzes have shown that it is important to separate the types of aviation in global risk analyzes in Polish aviation. Out of 97 accidents and serious incidents recorded in 2015-2020, only 2 occurred in the CAT sector. Additionally, in general aviation a much higher level of risk was identified in the verified incidents.

Key words: aviation safety, risk analysis, general aviation, commercial air transport

Michał GOŁĘBIEWSKI*
Marta GALANT-GOŁĘBIEWSKA*
Marta MACIEJEWSKA*

ANALIZA MOŻLIWOŚCI ZAPEWNIENIA ZAPOTRZEBOWANIA ENERGETYCZNEGO SYMULATORA LOTU CKAS MOTION SIM5 NA POTRZEBY SZKOLENIA

Sytuacja na świecie pokazała nie raz że infrastruktura krytyczna jest ważna w funkcjonowaniu każdego państwa oraz jego obywateli. Jest to szczególnie ważny element w aspekcie pojawiających się kryzysów oraz konfliktów światowych. Jednym z najwazniejszych systemów jest zaopatrzenie w energię elektryczną. W celu uniezależnienia obiektów infrastruktury krytycznej, od problemów z dostępem do sieci elektroenergetycznej stale poszukuje się alternatywnych źródeł zasilania.

W artykule przedstawiono analizę możliwości wykorzystania instalacji fotowoltaicznej jako źródła zasilania dla autonomicznego systemu symulacji lotu. Przeprowadzono próby polegające na określeniu energochłonności urządzenia w ujęciu długofalowym jak i w szczytowych momentach zapotrzebowania energetycznego. Pod uwagę wzięto również profil nasłonecznienia i możliwości uzyskania energii z paneli w zależności od ich lokalizacji i liczby. Wykazano, że 150 paneli fotowoltaicznych może zaspokoić zapotrzebowanie energetyczne urządzenia symulacji lotu na potrzeby przeprowadznia szkoleń.

Stosowanie alternatywnych źródeł zasilania jest drogą do uzyskania niezależności energetycznej. Jest to szczególnie istotne gdy analizowane są obiekty infrastruktury krytycznej. Niniejsza praca może wskazać zarządcom takiej infrastruktury drogę działania, a przedstawiona w pracy metodyka może być wykorzystana do obliczeń dla dowolnego systemu wykorzystującego energię elektryczną do zasilania.

Słowa kluczowe: ogniwa fotowoltaiczne, symulatory lotu, szkolenie lotnicze, infrastruktura krytyczna, energochłonność, zużycie energii

* Politechnika Poznańska

1. WPROWADZENIE

Energetyka jest kluczowym sektorem gospodarki każdego państwa. Ciężko wyobrazić sobie w obecnych czasach całkowity zanik energii elektrycznej. Spowodowałoby to paraliż całego kraju. Niemożliwe okazały by się z pozru błache czynności takie jak płatności czy załatwianie spraw urzędowych. Sytuacja mogła by się również okazać ryzykowna dla życia. W Wenezueli tragiczne w skutkach okazały się awarie dwóch elektrowni trwające prawie dwa dni. Ofiarami było 15 pacjentów szpitali objętych zasięgiem wyłączonych bloków energetycznych [cire.pl 2019]. W przypadku działań wojskowych, energetyka jest jednym z kluczowych celów ataku. Pierwsze działania prowadzone były już w czasach II Wojny Światowej kiedy to lotnictwo alianckie pomyślnie zaatakowało zapory oraz dwie elektrownie wodne na terenie Niemiec [samoloty.pl 2012]. Kolejne działania tego typu miały miejsce na terenie bliskiego wschodu gdzie w 1981 r. wojska Izraela zbombardowały blok elektrowni atomowej [samoloty.pl]. Nowa forma działań wojskowych oparta o ataki cybernetyczne dotknęła Iran w 2010 r. gdzie destabilizacji uległ system wzbogacania uranu [polityka.pl 2012]. W przypadku wkroczenia wojsk Federacji Rosyjskiej do Ukrainy w 2022 r., jednymi z głównych celi były również elektrownie które zostały zajęte. Dodatkowo utrudniona dostawa paliw kopalnych takich jak węgiel z części wschodnich kraju oraz gazu ziemnego skutkowała ograniczoną dostępnością energii w reszcie kraju [cire.pl 2022].

Analizując działania wojskowe z ostatniego wieku skupione na systemie energetycznym wroga można wywnioskować że konwencjonalne systemy energetyczne jak i energetyka rozproszona oparta o paliwa kopalne może być zagrożona w czasie działań wojennych. Postanowiono zatem przeanalizować odnawialne źródło energii jakim jest energia słoneczna w celu zasilenia systemu szkoleniowego opartego o symulator lotu.

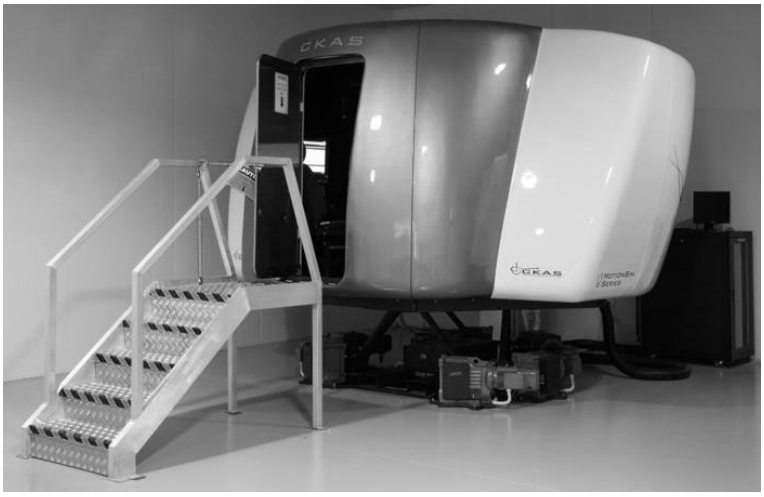
Urządzenia symulacji lotu są powszechnie stosowane w szkoleniu nowych adeptów lotnictwa. W lotnictwie cywilnym służą do nauki techniki pilotażu, w lotnictwie wojskowym, poza podstawowym wykorzystaniem, realizowane są również szkolnia związane z prowadzeniem walki powietrznej. Dzięki nim możliwe jest przeprowadzenie symulacji ataków bez konieczności szukania obszarów podobnych do atakowanego oraz ryzyka straty pilotów i maszyny w przypadku niepowodzeń. Co ciekawe, w czasie I Wojny Światowej piolotów szkolono głównie na urządzeniach symulacyjnych, a całe szkolenie trwało około 10 godzin. Dzisiaj podstawowe szkolenie lotnicze (licencja pilota turystycznego z ang. *Pilot Private Licence*, PPL) trwa 45 godzin, z których 5 można zrealizować na symulatorze lotu. Istanieją jednak statki powietrzne dla których nigdy nie zbudowano wersji dwusterowej, a całość szkolenia przeprowadzana jest na symulatorze lotu (np. Lockheed F-117 Nighthawk) [Zagdański, 1995]. Co więcej, poza nauką techniki pilotażu wykorzystując np. symulator samolotu F-22 można porównać jego własności bojowe z samolotem F-15 oraz prowadzić symulowane walki powietrzne z potencjalnym wrogiem (Su-27 i Su-35) [Zagdański, 1995]. Oczywiście wszystkie szkolenia podstawowe przeprowadzane są w czasie pokoju, kiedy to

zwykle nie ma problemu z dostępnością do źródeł energii elektrycznej. Jednak w czasie wojny mogą okazać co najmniej równie istotne, gdyż odcięcie dostępu do energii elektrycznej jest aktualnie, jak wsakazano wyżej, jednym z kluczowych i priorytetowych celów w dzisiejszych walkach.

Celem artykułu jest określenie możliwości wykorzystania instalacji fotowoltaicznej jako źródła zasilania dla autonomicznego systemu symulacji lotu.

2. OPIS OBIEKTU BADAŃ

Badania prowadzono w Laboratorium Badań Symulatorowych Zakładu Lotnictwa, Instytutu Silników Spalinowych i Napędów Politechniki Poznańskiej przy wykorzystaniu symulatora lotu CKAS MotionSim5 (rys. 1). Jest to system wykorzystujący oprogramowanie i sprzęt łączący w sobie niezawodność nowoczesnego komputera stacjonarnego zainstalowanego na specjalnie wykonanej platformie ruchowej, z kokpitem wyposażonym w urządzenia sterujące identyczne jak w prawdziwym samolocie lub do nich podobne [2].



Rys. 1. Symulator CKAS MotionSim5 [2 Instrukcja użytkowania symulatora FSTD CKAS MotionSim5, wersja 2.1 wydana 17 lipca 2015 r. przez CKAS Mechatronics.]

Symulator lotu CKAS MotionSim5 jest zaprojektowany do symulacji czterech ogólnych rodzajów samolotów lekkich: samolotów z jednym silnikiem tłokowym, samolotów z dwoma silnikami tłokowymi, lekkich samolotów z dwoma silnikami turbośmigłowymi oraz lekkich samolotów odrzutowych. Nie jest on przeznaczony do symulacji konkretnego modelu samolotu, lecz do symulacji sposobu obsługi i funkcji typowego samolotu klasy lekkiej.

Symulator wyposażony jest w ekran z projekcją obrazu o charakterze ciągłym (200° x 40°) uzyskanym za pośrednictwem 3 projektorów Full HD. Za ruch kabiny odpowiada elektryczny układ ruchu o sześciu stopniach swobody. Uzyskana jest dzięki temu wysoka dokładność w wykonywaniu ruchu, a system przechyla kadłub w każdym możliwym kierunku o kąt 18° i przesuwa go o 150 mm.

Za pomocą stanowiska instruktorskiego możliwa jest dowolna zmiana warunków atmosferycznych, symulacja awarii i usterek oraz prowadzenie symulacji na i w obrębie praktycznie każdego lotniska na świecie. Działanie przyrządów pokładowych znajdujących się w symulatorze, takich jak wolant, pedały, przyrządy sterowania silnikiem, panel audio itp. jest identyczne lub bardzo podobne do działania przyrządów w rzeczywistych samolocie. Na rysunku 2 przedstawiono widok kokpitu w symulatorze MotionSim5.

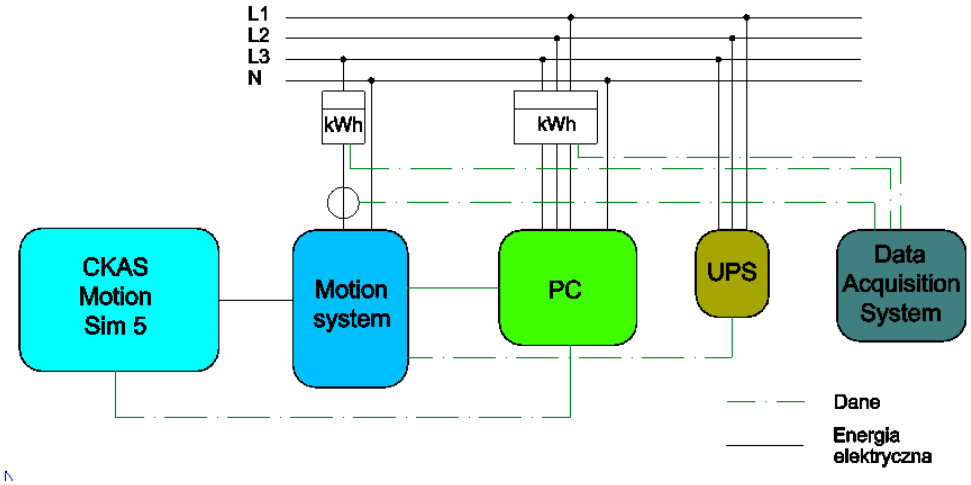
Rys. 2. Widok kokpit w symulatorze CKAS MotionSim5

3. METODYKA BADAŃ

3.1. Pomiar zapotrzebowania na energię elektryczną

Analiza zużycia energii przez system symulacji lotu zaostała oparta o pomiar wszystkich przyłączy elektrycznych doprowadzonych do systemu CKAS MotionSim5. Pierwszym źródłem energii było przyłącze trójfazowe (16A) służące do zasilania jednostki sterującej i wizualizującej opartej o klaster złożony z 5 jednostek obliczeniowych. Drugie źródło energii to przyłącze jednofazowe (80A) zasilające system

Motion. Badania przeprowadzone we wcześniejszych pracach autorów wykazały stabilne zapotrzebowanie na moc przez system sterujący i wizualizacji [Gołębiewski et al 2021]. We wspomnianych badaniach analizowano wpływ zmiany konfiguracji symulatora, zmiany warunków atmosferycznych oraz użycia platoformy Motion na zużycie energii symulatora podczas wykonywania przez pilotów operacji kręgu nadlotniskowego. Szczegółowo przeanalizowano wskazane wyżej parametry i wysnuto wnioski. Zauważalne zmiany były widoczne jedynie przy zmianach warunków pogodowych. Największą nierównomiernością poboru prądu charakteryzował się natomiast system Motion. W związku z powyższym zastosowano przekładnik prądowy w celu dokładnej analizy przebiegu wartości natężenia pobieranej energii elektrycznej w czasie. Schemat stanowiska pomiarowego został przedstawiony na rys. 3.



Rys. 3. System pomiaru energii elektryznej wykorzystany do pomiaru symulatora lotu CKAS Motion Sim 5.

3.2. Model instalacji PV

Obliczenia instalacji fotowoltaicznej zostały oparte o zmienne wartości promieniowania słonecznego w poszczególnych miesiącach jak i godzinach. Dodatkowo wykorzystano model zmiany kąta AOI (Angle of incidence) padania promieni słonecznych do normalnej powierzchni paneli fotowoltaicznych [Iqbal 1983]. W tym celu posłużono się formułą:

$$AOI = cos^{-1}[cos(\beta) \cdot cos(\phi) + sin(\beta) \cdot sin(\phi) \cdot cos(\psi - \gamma)] \quad (1)$$

gdzie:
AOI – kąt padania promieni słonecznych na powierzchnię paneli fotowoltaicznych [º],
β– kąt pochylenia paneli fotowoltaicznych [º],

ϕ – kąt pomiędzy kierunkiem padania promieni słonecznych a zenitem [º],
ψ – kąt pomiędzy kierunkiem padania promieni słonecznych a kierunkiem północnym [º],
γ – kąt pomiędzy normalną powierzchni paneli fotowoltaicznych a kierunkiem północnym [º].

Całkowitą ilość promieniowania słonecznego obliczono uwzględniając poszczególne jego składowe. W tym celu posłużono się danymi pogodowymi uśrednionymi na podstawie kilku ostatnich lat oraz formułą:

$$E = E_b + E_g + E_d = DNI \cdot cos(AOI) + GHI \cdot a \cdot \frac{(1-cos(\beta))}{2} + DHI \qquad (2)$$

gdzie:
E – ilość promieniowania padającego na powierzchnię paneli fotowoltaicznych [W/m2],
E_b– promieniowanie bezpośrednie padające na panele PV [W/m2],
E_g – promieniowanie odbite od otoczenia padające na panele PV [W/m2],
E_d – promieniowanie padające na panele PV pochodzące z dyfuzji promieni słonecznych w atmosferze [W/m2],
DNI – promieniowanie słoneczne bezpośrednie [W/m2],
GHI – promieniowanie słoneczne odbite od otoczenia [W/m2],
DHI – promieniowanie słoneczne pochodzące z dyfuzji promieni słonecznych w atmosferze [W/m2],
AOI – kąt padania promieni słonecznych na powierzchnię paneli fotowoltaicznych [º],
a – współczynnik odbicia promieniowania słonecznego od otoczenia [º],
β– kąt pochylenia paneli fotowoltaicznych [º].

4. WYNIKI

4.1. Zapotrzebowanie na energię elektryczną

Otrzymane wyniki mocy średnich dla uwzględnionych warunków zostały przedstawine w tabeli tab. 1. Maksymalne wartości zostały osiągnięte dla scenariusza operacji, w której wykonywano krąg nadlotniskowy w samolocie z silnikiem odrzutowym podczas deszczu. Jednocześnie analiza maksymlanych wartości mocy wykazała jej wartość w piku wynoszącą ponad 13 kW przy średniej wartości na poziomie 0,96 kW. Określono również, że przy scenariuszu o najwyższym zużyciu energii, wartości mocy bliskich szczytowym osiągano przez ok. 14% czasu.

Tabela 1

Wzór podpisu nad tabelą

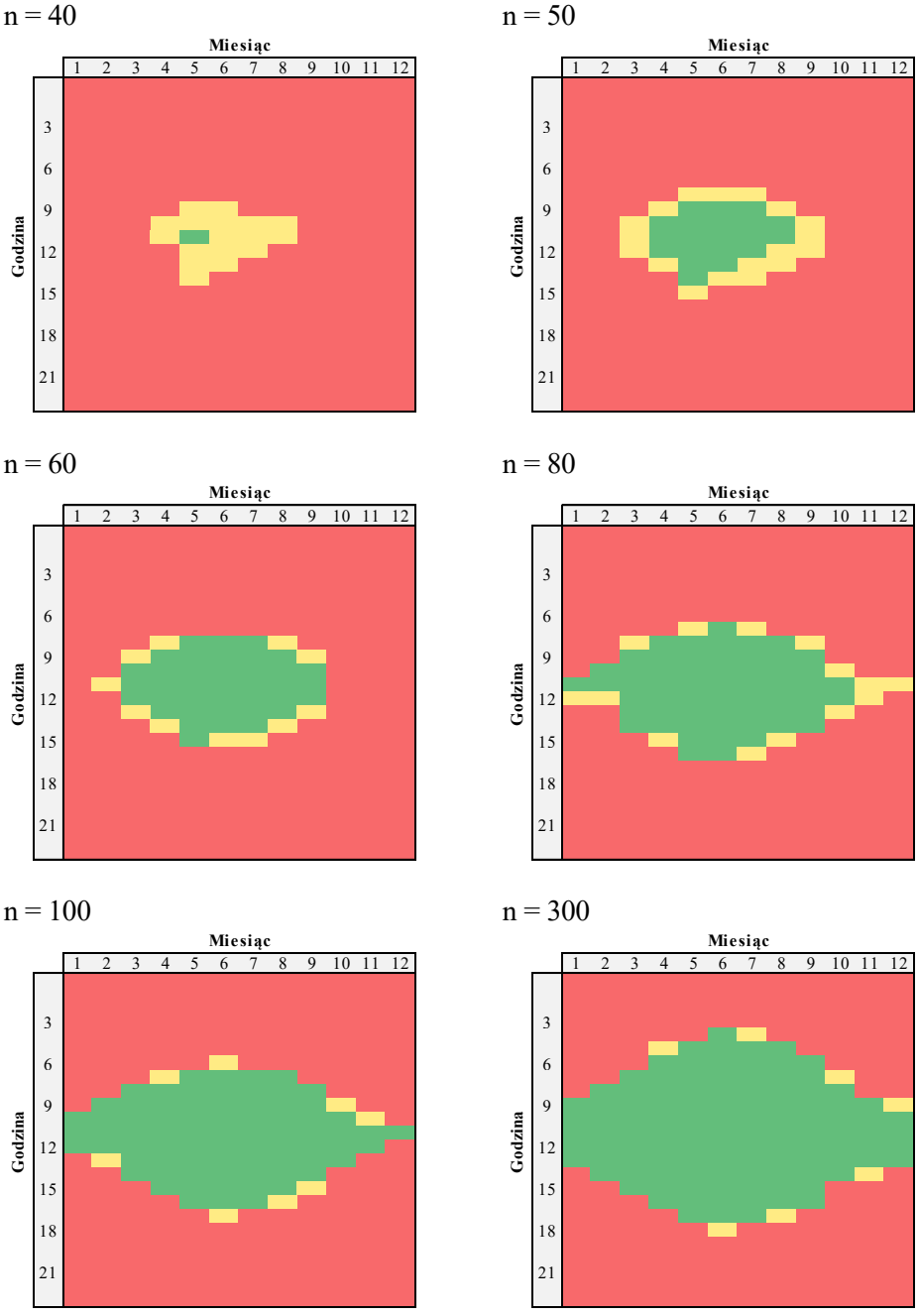
Parametr	Wartość	Jednostka
Średnia moc całkowita	3,61	kW
Średnia moc układu wizualizacji i sterowania	2,54	kW
Średnia moc systemu Motion	0,96	kW
Szczytowa wartość mocy systemu Motion	13,2	kW

4.3. Instalacja fotowoltaiczna

Analizując otrzymane dane dotyczące zapotrzebowania na moc, zauważyć można znaczną różnicę pomiędzy mocami śrenimi a szczytowymi, sięgająca 366%. Projektowana instalacja na moc maksymalną może się okazać zbyt kosztowna a wymagana powierzchnia zbyt duża w stosunku do otrzymanych korzyści. W związku z powyższym przyjęto układ oparty na systemie podtrzymania zasilania UPS w wersji online. Rozwiązanie to zapewni ciągłość dostawy energii elektrycznej w momentach gdy wymagana moc przekroczy możliwości instalacji fotowoltaicznej.

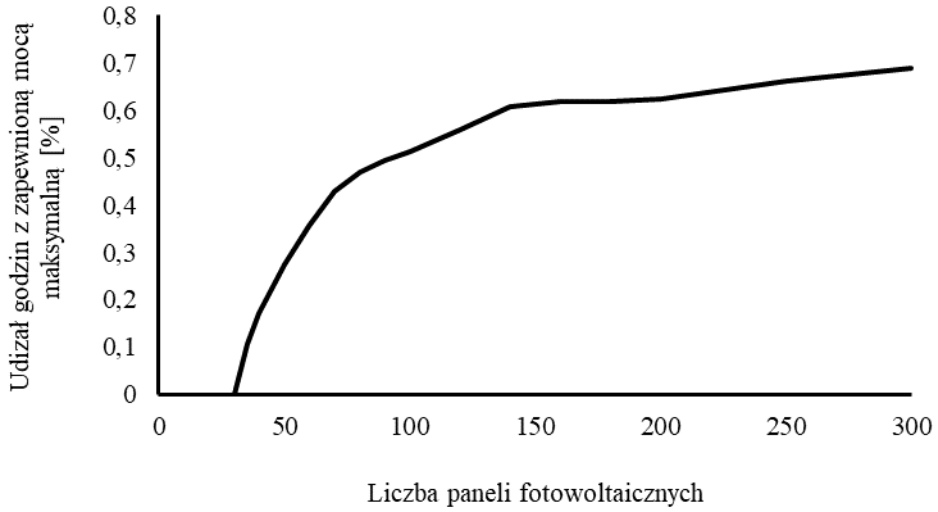
Określona została minimalna moc równa 4,72 kW. Była ona wyznaczona na podstawie średniej mocy ważonej pomiędzy wartościami średnimi, maksymalnymi i czasami ich trwania. Dodatkowo przyjęto współczynnik zapasu mocy na poziomie 1,2, co w efekcie dało docelową wartość mocy wymaganej instalacji PV na poziomie 5,66 kW.

Na podstawie przyjętego modelu nasłonecznienia oraz danych pogodowych określono wartości promieniowania docierającego do powierzchni paneli PV. Przyjęto sprawności paneli na poziomie η_{PV}=15% oraz invertere η_{inv}=96%. Parametrem zmiennym została liczba paneli zastosowana w instalacji PV. Na rysunku 4 przedstawiono rozkłady godzin w poszczególnych miesiącach, w których możliwe jest zastosowanie przyjętego układu do zasilania analizowanego symulatora lotu. Kolory zielone oznaczają spełnienie zapotrzebowania na wymaganą moc docelową zaś żółte na moc minimalną. Kolor czerwony oznacza, że instalacja nie spełnia minimalnych założeń.



Rys. 4. Zależność pomiędzy zapewnieniem mocy wymaganej (zielony) i minimalnej (żółty) od ilości zainstalowanych paneli fotowoltaicznych n.

Uwzględniwszy powyższe dane, określono udział procentowy godzin w roku, w których możliwe jest wykorzystanie autonomicznej instalacji. Założono, iż docelowym zakresem roboczym w ciągu dnia są godziny 6-20. Wyniki przedstawiono na rysunku nr 5.



Rys. 5. Zmiana udziału godzin roboczych autonomicznego systemu symulacji lotu w zależności od liczby modułów instalacji fotowoltaicznej.

Brak znaczącej zmiany parametrów na wykresie (rys. 5) zaobserwowano przy liczbie paneli fotowoltaicznych określonej na około 150 sztuk. Oznacza to, że dalsza rozbudowa instalacji nie musi przynieść wymiernych korzyści. Natomiast ograniczenie mocy jest w większej mierze uzależnione od promieniowania słonecznego w okresie zimowym i jesiennym.Powyższy wykres wykazuje również że ogniwa fotowoltaiczne mogą sprostać zapotrzebowaniu energetycznemu. Aktualnie produkowane panele mają sprawność do 19% jednak rozwój technologii pozwala z optymizmem patrzeć na ich przyszłość. Wraz ze zwiększeniem sprawności paneli zmniejszała się będzie ich liczba w układzie, co wpłynie na większą opłacalność wskazanego rozwiązania. Należy również podkreślić, że w kryzysowej sytuacji związanej z brakiem możliwości zasilania z sieci koszt jest drugorzędny – kluczowym jest spełnienie zapotrzebowania energetycznego.

5. PODSUMOWANIE

Praca miała na celu określenie możliwości zastosowania altarnatywnego źródła zasilania w energię elektryczną dla symulatora lotu CKAS MotionSim5. W ramach prac

wstępnych, przedstawionych w cytowanej tu pracy autorów, określono zapotrzebowanie eneretyczne urządzenia w zależności od wybranego scenariusza realizacji zadania. Analizowano wpływ konfiguracji oraz warunków atmosferycznych na energochłonność systemu. W niniejszej pracy postanowiono pójść o krok dalej i przeanlizowano możliwość zabezpieczenia ośrodka szkolenia przed nagłą utratą energii elektrycznej z sieci. Dzięki instalacji fotowoltaicznej możliwe będzie ciągłe realizowanie szkoleń przy użyciu symulatora, nawet w czasie kryzysu energetycznego.

Obecne czasy wskazują na istotę infrastruktury krytycznej, zarówno w czasie pokoju jak i w czasie wojny. Coraz częściej jednak wspomina się, że kluczowym elementem infrastruktury krytycznej jest człowiek. To właśnie ta myśl towarzyszyła przy prezentowanych w pracy analizach. W czasie kryzysu może wystąpić konieczność szybkiego i pilnego doszkolenia pilotów. Ważne aby zarządcy infrastruktury (również szkoleniowej) mieli na uwadze możliwość zasilania jej alternatywnymi źródłami energii – takimi jak np. panele fotowoltaiczne.

LITERATURA

Artykuły w czasopismach

1. Zagdański Z., 1995 „Stany awaryjne statków powietrznych", Warszawa, ITWL, ISBN 8390081733
2. Instrukcja użytkowania symulatora FSTD CKAS MotionSim5, wersja 2.1 wydana 17 lipca 2015 r. przez CKAS Mechatronics.
3. Golebiewski M., Galant-Gołębiewska M., Jasiński R., 2022 „Flight Simulator's Energy Consumption Depending on the Conditions of the Air Operation", Energies tom 15
4. Iqbal, M., 1985, „An Introduction to Solar Radiation", Academic Press: Cambridge, ISBN 9780323151818

Komunikaty Internetowe

1. https://www.cire.pl/artykuly/serwis-informacyjny-cire-24/144674-tragiczne-skutki-przerwy-w-dostawach-energii-elektrycznej-w-wenezueli - dostęp 30.05.2022r
2. https://www.samoloty.pl/artykuly-lotnicze/9291-pogromcy-zapor-operacja-qchastiseq - dostęp 30.05.2022r
3. https://www.samoloty.pl/artykuly-lotnicze/9064-operacja-qoperaq-czyli-rajd-na-reaktor - dostęp 30.05.2022r
4. https://www.polityka.pl/tygodnikpolityka/swiat/1523583,1,skoordynowany-atak-na-iran-sprawcy-nieznani.read - dostęp 30.05.2022r
5. https://www.cire.pl/artykuly/materialy-problemowe/system-elektroenergetyczny-ukrainy-pokoj-i-wojna - dostęp 30.05.2022r
6. https://www.cire.pl/artykuly/serwis-informacyjny-cire-24/183256-mosad-przeprowadzil-cyberatak-na-iranski-osrodek-nuklearny-natanz - dostęp 30.05.2022r

ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF PROVIDING THE ENERGY DEMAND OF THE CKAS MOTION SIM5 FLIGHT SIMULATOR FOR TRAINING

Abstract

The situation in the world has shown more than once that critical infrastructure is important for the functioning of each country and its citizens. It is a particularly important element in the aspect of emerging crises and world conflicts. One of the most important systems is the electricity supply. In order to make the objects of the critical infrastructure independent of problems with access to the power grid, alternative sources of power are constantly searched for.

The article presents an analysis of the possibility of using a photovoltaic installation as a power source for an autonomous flight simulation system. Tests were carried out to determine the energy consumption of the device in terms of long-term and peak energy demand. The insolation profile and the possibility of obtaining energy from the panels depending on their location and number were also taken into account. It has been shown that 150 photovoltaic panels can meet the energy demand of a flight simulation device for the purpose of conducting training.

Using alternative power sources is the way to energy independence. It is especially important when critical infrastructure objects are analyzed. This paper may indicate the way of operation to the managers of such infrastructure, and the methodology presented in the paper may be used for calculations for any system that uses electricity to supply power.

Keywords: photovoltaic cells, flight simulators, aviation training, critical infrastructure, energy consumption

Karol GOŁOŚ*
Bartosz CIUPEK*
Radosław JANKOWSKI*

PERSPEKTYWA ROZWOJU ŹRÓDEŁ ENERGII CIEPLNEJ DO OGRZEWANIA BUDYNKÓW I OBIEKTÓW STRATEGICZNYCH W KONTEKŚCIE POZIOMU STĘŻEŃ GAZOWYCH ZANIECZYSZCZEŃ POWIETRZA

Przeprowadzono analizę jakości powietrza w Polsce w latach 2000 – 2020 wraz z porównaniem danych ilościowych dotyczących wprowadzonych urządzeń grzewczych do obrotu. Głównymi gazowymi zanieczyszczeniami powietrza z sektora ogrzewnictwa indywidualnego są tlenki azotu NO_x, tlenek węgla CO oraz ditlenek siarki SO_2. Z biegiem lat zaobserwowano nieznaczne spadki w poziomach stężeń zanieczyszczeń, lecz spośród ponad 3 milionów pozaklasowych urządzeń grzewczych, ponad 80% wciąż jest eksploatowana w istniejącym budownictwie. Przeprowadzona analiza pozwoliła na sprecyzowanie kierunków wymagających rozwoju ku poprawie jakości powietrza oraz aspektów wymagających szczególnej uwagi pod kątem bezpieczeństwa ekologicznego oraz niezależności energetycznej szczególnie w przypadku obiektów strategicznych.

Słowa kluczowe: jakość powietrza, emisja, paliwa, ogrzewnictwo

1. WPROWADZENIE

Ogrzewnictwo w Polsce i na świecie w środowisku naukowym postrzegane jest silnie w perspektywie emitowanych przez źródła ciepła substancji szkodliwych [Elsayed i Khairy 2018, Pełka et al. 2021]. Powodem takiego stanu rzeczy są procesy spalania i reakcje chemiczne jakie w nich zachodzą. Wynikają one bezpośrednio z ich parametrów fizykochemicznych szczególnie w przypadku paliw stałych, jak i w paliwach gazowych [Ciupek i Gołoś 2020]. Kolejnym czynnikiem jest sposób prowadze-

*Instytut Energetyki Cieplnej, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Poznańska

nia procesów spalania w zależności od konstrukcji palnika oraz współczynnika nadmiaru powietrza [Ciupek et al. 2019]. Analizując obecną sytuację na rynku sektora grzewczego małej i średniej mocy, w tym w szczególności osiedli i budynków jedno i wielorodzinnych, a także obiektów komercyjnych i strategicznych można zauważyć szerokie wykorzystanie nieefektywnych ekologicznie urządzeń grzewczych oraz wysoce emisyjnych nośników energii, które są głównym przyczyną powstawania niskiej emisji [Gołoś et al. 2021].

Zagadnienie poprawy jakości powietrza w Polsce jest poruszane od wielu lat, co jest szczególnie widoczne przez dotychczasowe działania, takie jak szereg dofinansowań do wymiany nieekologicznych źródeł ciepła, a także programy monitoringu poziomów stężeń gazowych i stałych substancji szkodliwych w powietrzu [Ustawa Dz.U. 2001 nr 62 poz. 627, 27.04.2001]. W analizie efektów działań na rzecz poprawy jakości powietrza można dopatrzeć się zaledwie niewielkiej poprawy, która z biegiem lat obniża ilości dni w ciągu roku z przekroczeniem poziomów dopuszczalnych stężeń substancji szkodliwych w powietrzu. W obliczu restrykcji, które są uwarunkowane założeniami transformacji energetycznej Polski [Obwieszczenie M.P. 2021 poz. 264, 2.03.2021], należy jednak wdrożyć nowe rozwiązania, które przyspieszą wymienność nieekologicznych nośników energii oraz nieefektywnych źródeł ciepła. Oprócz problematyki związanej z paliwami i konstrukcją źródeł ciepła, w dyskusji naukowej [Junga, Wzorek i Kaszubska 2017, Ciupek et al. 2021] zbadane zostały czynniki związane z nieprawidłowo eksploatowanymi urządzenia grzewczymi, które stanowią kolejne źródło powstawania niskiej emisji. W obliczu zmieniającej się dynamiki cen nośników energii oraz ich dostępności, nie mniej ważnym aspektem jest zapewnienie ciągłości pracy systemów grzewczych, w szczególności obiektów, które wymagają stabilnej pracy, takich jak jednostek wojskowych, czy medycznych. Niezależność energetyczną w połączeniu z zeroemisyjnością można osiągnąć poprzez samodzielne wytwarzanie energii oraz jej autokonsumpcję, bądź magazynowanie w postaci akumulatorów energii elektrycznej, bądź w postaci energii cieplnej we wszelkiego rodzaju zbiornikach wody grzewczej i użytkowej.

Celem autorów artykułu było zbadanie zmienności poziomów stężeń gazowych substancji szkodliwych w powietrzu na terenie Polski w latach 2000 - 2020, a także analiza statystyk dotyczących wprowadzania do obrotu urządzeń grzewczych zasilanych różnymi nośnikami energii. Dodatkowo porównano w konkluzji urządzenia grzewcze w budynkach istniejących w stosunku do ich wpływu na emitowane związki szkodliwe. Poprzez zestawienie powyższych danych pomiarowych i statystycznych, autorzy zaproponowali kierunki wymagające zmiany oraz określili zależność pomiędzy wyborem różnych urządzeń grzewczych przez inwestorów, a jakością powietrza w Polsce z podziałem na dwa okresy w ciągu roku dla analizowanych lat.

2. ODDZIAŁYWANIE ŚRODOWISKOWE SYSTEMÓW ZASILANIA

Eksploatacja systemów grzewczych w Polsce i na świecie jest ściśle związana z jakością powietrza i poziomami stężeń substancji w nim zawartych. Bazując o informacje na temat zinwentaryzowanych źródeł ciepła, można zatem wytypować lokalizacje, które będą najbardziej narażone na tak zwaną „niską emisję". Skutkiem tego zjawiska jest ekspozycja ludzi na powietrzu o przekroczonych dopuszczalnych poziomach stężeń wybranych substancji, co stanowi poważne w skutkach zagrożenie zdrowia związane z przenikaniem ludzkiego organizmu poprzez ditlenek siarki (SO2), tlenek węgla (CO) oraz tlenki azotu (NO_x), które stanowią sumę dwutlenku azotu i tlenku azotu w przeliczeniu na dwutlenek azotu. Oprócz gazowych zanieczyszczeń, równie istotne są obecne stałe cząstki (PM2.5) i (PM10), jak również silne kancerogenny benzo(a)piren zawarty w spalinach. Zgodnie z polskimi i europejskimi wytycznymi, ocenę jakości powietrza realizuje się przy założeniu pewnych norm w odniesieniu do analizowanych substancji szkodliwych. W związku z tym zgodnie z Rozporządzeniem [Dz.U. 2012 poz.1031, 03.12.2012] przyjęto wartości poziomów dopuszczalnych w rozumieniu określonej wartości, która od wyznaczonego terminu nie powinna być już przekraczana. Jeżeli dalej przekroczenia takie występują, na tej podstawie można planować działania zapobiegawcze pod kątem ochrony zdrowia ludzi.

Poziomy dopuszczalne gazowych substancji mierzone przy temperaturze i ciśnieniu atmosferycznym odpowiednio: 293 K, 101,3 kPa, zgodnie z rozporządzeniem przedstawiono w Tabeli 1.

Tabela 1

Poziomy dopuszczalne gazowych substancji w powietrzu

Nazwa substancji	Okres uśredniania pomiarów	Poziom dopuszczalny [$\mu g/m^3$]	Dopuszczalna ilość przekroczeń w roku
Tlenki azotu (NO_x)	Rok kalendarzowy	30	18
Tlenek węgla (CO)	8 godzin	10 000	-
Ditlenek siarki (SO_2)	1 godzina	350	24

W celu zbadania wpływu jakości powietrza i przekroczeń dopuszaczalnych poziomów stężeń na ludzkie zdrowia określono dotychczas w szeregu prac naukowych, które narządy oraz w jakich przedziałach wiekowych, ludzie są najbardziej narażeni

bazując o częstotliwość chorób oraz porównanie poziomów stężeń powyższych substancji w różnych lokalizacjach [Badyda, Grellier i Dąbrowiecki 2016, Dąbrowiecki et al. 2022].

Istotnym z punktu widzenia ochrony środowiska i powietrza atmosferycznego jest monitorowanie poziomów stężeń wybranych substancji w powietrzu, które mogą wskazywać na ich źródła pochodzenia oraz zmienność w skali czasu. Jednym rozwiązań utworzonych w tym celu jest Państwowy Monitoring Środowiska (PMŚ) utworzony na podstawie Ustawy o Inspekcji Ochrony Środowiska [Ustawa Dz.U. 1991 nr 77 poz. 335, 20.07.1991]. System pomiarowy nie wpływa jednak bezpośrednio na ograniczenie emitowanych substancji szkodliwych do atmosfery, lecz stanowi wyłącznie funkcję informacyjną. Informacje te mogą być jednak przydatne, celem utworzenia programów priorytetowych lub zdefiniowania źródeł emisji oraz wyeliminowania ich przyczyn. Co więcej analiza jakości powietrza wskazuje przesłanki na temat słuszności procesu dekarbonizacji w ogrzewnictwie.

3. METODYKA BADAWCZA

Pełna analiza wykonana w ramach pracy polegała na zestawieniu danych dotyczących jakości powietrza w Polsce w odniesieniu do poziomów stężeń wybranych, gazowych zanieczyszczeń takich jak ditlenek siarki (SO2), tlenek węgla (CO) oraz tlenki azotu (NO_x) na przełomie lat 2000-2020 z bazy danych rejestru Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska, którego podstawę stanowi Państwowy Monitoring Środowiska (PMŚ). Drugi etap polegał na zestawieniu statystyki sprzedaży źródeł ciepła na przełomie lat 2011 – 2021, bazując o dane z raportu [SPIUG, 18.04.2021] Stowarzyszenia Producentów i Importerów Urządzeń Grzewczych (SPIUG).

PMŚ stanowi ogólnodostępną sieć pomiarową w połączeniu z oceną i prognozami stanu środowiska, która posiada w swojej infrastrukturze łącznie 1895 stanowisk pomiarowych (stan na 2022 rok), zlokalizowanych w całej Polsce, a w szczególności w lokalizacjach o największym zagrożeniu środowiskowym, czyli tam gdzie rejestrowane są największe ilości dni w roku z przekroczeniem dopuszczalnych poziomów stężeń substancji szkodliwych w powietrzu. Sieć pomiarowa obejmuje strefy, które zgodnie z programem zostały zdefiniowane jako: aglomeracja o liczbie mieszkańców większej niż 250 tysięcy, miasto o liczbie mieszkańców powyżej 100 tysięcy oraz pozostały obszar województwa, niewchodzący w skład miast powyżej 100 tysięcy mieszkańców oraz aglomeracji. Stacje pomiarowe rejestrują pomiary stężeń wybranych substancji szkodliwych zgodnie Rorządzeniem Ministra Środowiska [Rozporządzenie Dz.U. 2020 poz. 2279, 11.12.2020]. Do pomiaru gazowych substancji najintensywniej pojawiających się w powietrzu atmosferycznym, mianowicie NO_x, SO_2, oraz CO stosowane są referencyjne metody badawcze, odpowiednio chemiluminescencja [PN-EN 14211:2013-02], fluorescencja w nadfiolecie [PN-EN

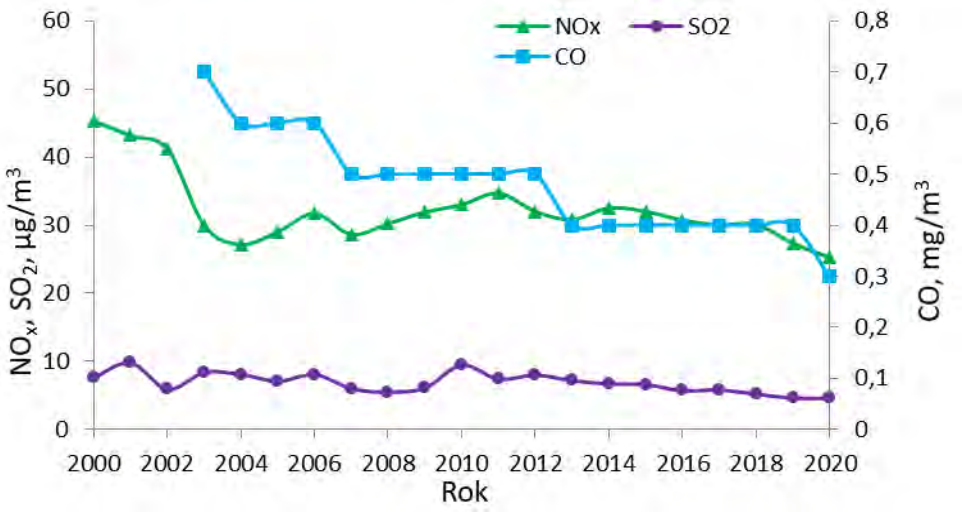
14212:2013-02] oraz niedyspersyjna spektroskopia w podczerwieni [PN-EN 14626:2013-02].

Pomiary są dokonywane automatycznie do banku danych pomiarowych Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska, bądź manualnie, przy czym tego typu metodyka wymaga fizycznego pobrania próbek, przekazania ich do laboratorium i określenia rzeczywistych wartości, co wiąże się z odstępem czasowym ze względu na specyfikę tego typu wykonywania pomiarów. Wszystkie pomiary gromadzone są w bazie danych JPOAT2,0 i podawane w jednostkach $\mu g/m^3$ lub mg/m^3.

4. WYNIKI BADAŃ

Wyniki badań zostały przedstawione w postaci graficznej oraz tabelarycznej z uwzględnieniem gazowych substancji szkodliwych, których zmienność w skali 20 lat omówiono w kolejnych etapach. Do tego celu wytypowane zostały substancje, które mają bezpośredni związek z ogrzewnictwem budynków mieszkalnych oraz strategicznych w Polsce, w szczególności z kotłami grzewczymi na paliwa stałe. Do substancji tych należą tlenki węgla (CO) mierzone w mg/m^3, tlenki azotu NO_x oraz dwutlenek siarki SO_2 mierzone w $\mu g/m^3$. Pomiary SO_2 oraz NO_x realizowane były przez Państwowy Monitoring Środowiska od 2000 roku, natomiast CO – ze względu na ograniczoną infrastrukturę pomiarową od 2003 roku.

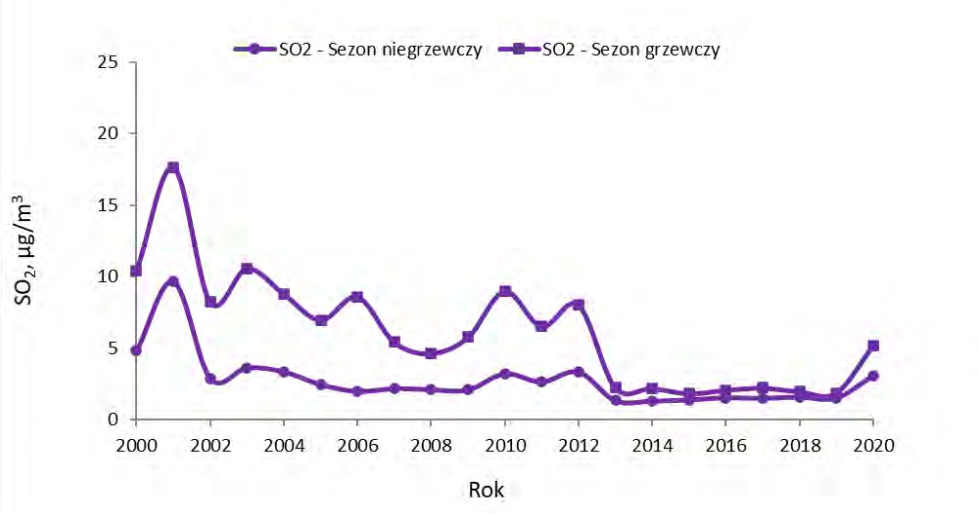
Analiza zmienności powyższych substancji w skali lat 2000 – 2020 przedstawiona została na Rys. 1.



Rys. 1. Poziomy stężeń NO_x, CO, SO_2 w powietrzu w latach 2000 – 2020

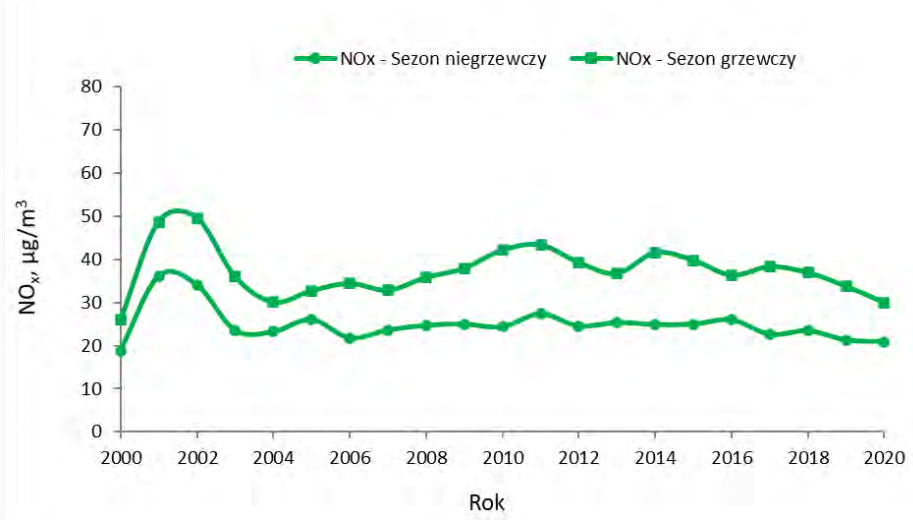
Na podstawie zgromadzonych i opracowanych pomiarów zaobserwować można tendencję spadkową dla każdej z substancji. Porównując średnie wartości roczne dla lat 2000 - 2020 w odniesieniu do ditlenku siarki był to spadek o 3,1 µg/m^3 (40,25%), dla tlenków azotu był to spadek o 20,2 µg/m^3 (44,49%), natomiast w odniesieniu do roku 2003 - 2020 dla CO był to spadek o 0,4 mg/m^3 (57,14%), skutkiem czego jakość powietrza zgodnie z oceną Państwowego Monitoringu Środowiska przypisana została do indeksu o stopniu dobrym.

Z punktu widzenia systemów zasilania budynków w energię cieplną istotne było zbadanie zmienności w określonych okresach w ciągu roku, w których źródła ciepła są wykorzystywane ze szczególną intensywnością. W metodyce pomiarów zostało to ujęte jako okres grzewczy, który trwa od 1 października do 31 marca kolejnego roku oraz okres letni przyporządkowany do pozostałego okresu czasu. Okres grzewczy zaliczany jest do wykorzystania źródeł ciepła na cele centralnego ogrzewania budynków oraz do podgrzewu ciepłej wody użytkowej i alternatywnie ogrzewania basenów, bądź innych odbiorników. W okresie letnim urządzenia grzewcze są wykorzystywane wyłącznie do podgrzewu ciepłej wody użytkowej. W dalszych krokach analizy zbadano przebieg poziomów stężeń wybranych substancji gazowych w postaci graficznej z podziałem na sezon grzewczy oraz letni, odpowiednio dla SO_2 na Rys. 2, NO_x na Rys. 3 oraz CO na Rys. 4.

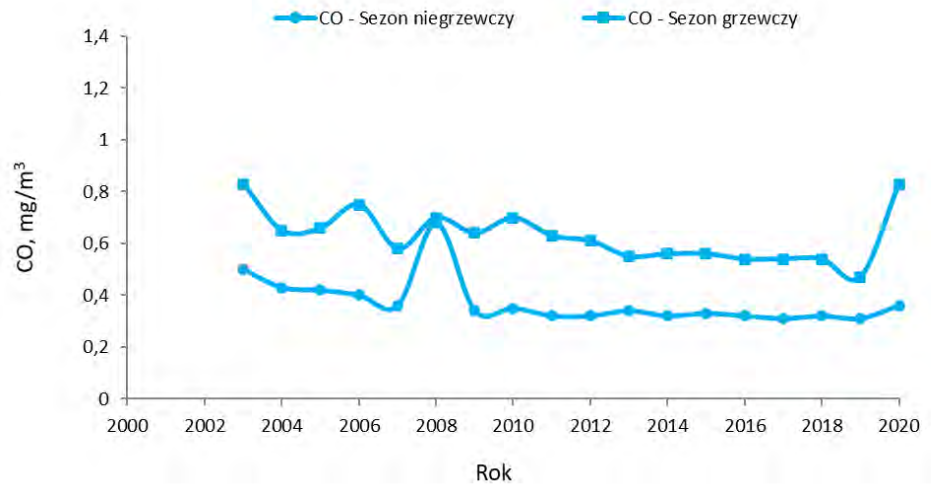


Rys. 2. Poziomy stężeń SO_2 w sezonie grzewczym i letnim w latach 2000 – 2020

Różnica w poziomach stężeń dla ditlenku siarki na Rys. 2 w okresie grzewczym i letnim oscylowała w granicach od 0,36 µg/m^3 w 2019 do 7,94 µg/m^3 w roku 2001. Zaobserwowano tendencję spadkową i zmniejszające się różnice w obu okresach, które są związane ze skutecznym obniżaniem emisji w okresie zimowym. W perspektywie analizowanych lat w okresach grzewczych zaobserwowano spadek o 89,56%, z kolei w sezonach letnich spadek wyniósł zaledwie 13,53%.



Rys. 3. Poziomy stężeń NO_x w sezonie grzewczym i letnim w latach 2000 – 2020



Rys. 4. Poziomy stężeń CO w sezonie grzewczym i letnim w latach 2003 – 2020

W przypadku tlenków azotu na Rys. 3 widoczny był trend poziomy z niewielkimi obniżaniem się stężeń NO_x w powietrzu. Najmniejszą różnicę pomiędzy analizowanymi okresami odnotowano w roku 2005 o wartości 6,69 µg/m^3, z kolei największa różnica nastąpiła w roku 2010 o wartości 17,81 µg/m^3. Całkowity poziom zmian w skali lat 2000 – 2020 był nieregularny dla tej substancji, dlatego jej źródła można upatrywać zarówno w ogrzewnictwie, jak również innych działalnościach przemysłowych, w tym również w transporcie drogowym. W perspektywie 2000 – 2020

największy spadek w sezonach grzewczych wyniósł 39,45%, a dla sezonów letnich 47,75%.

Ostatni z analizowanych związków, czyli tlenek węgla (II) zmierzony został od 2003 roku, w wyniku wprowadzenia do użytku pierwszych stacji pomiarowych do CO. Na przestrzeni lat zaobserwowano powolny spadek oraz stabilne różnice pomiędzy sezonem grzewczym i letnim. Minimalna różnica stężenia CO dla okresu letniego w stosunku do okresu grzewczego wyniosła 0,02 mg/m^3, natomiast maksymalna różnica wyniosła 0,47 mg/m^3. W perspektywie 2000 – 2020 największy spadek w trakcie sezonów grzewczych wyniósł 43,37%, z kolei dla okresów letnich spadek wyniósł maksymalnie 54,41%. Zarówno dla SO_2, jak i CO zauważono wzrost poziomu stężeń w roku 2020, który mógł być spowodowany wybuchem pandemii i całkowitą reorganizacją życia społeczeństwa polskiego.

W ogólnym spektrum analizowanych związków, najbardziej korzystne zmiany odnotowano dla SO_2, mogące wskazywać na zwiększenie zastosowania zero i niskoemisyjnych źródeł ciepła, co było kolejnym etapem analizy wykonanej przez autorów artykułu. Kolejną kwestią, która mogła mieć wpływ na obniżenie poziomów stężeń ditlenku siarki mogło być wprowadzenie wymagań jakościowych dotyczących kopalnych paliw stałych i zwiększenie zainteresowania spalaniem biomasy w kotłach grzewczych. Najmniejsze zmiany w poziomach stężeń odnotowano dla tlenków azotu. Pojawiające się tendencje spadkowe we wszystkich przypadkach dotyczyły w głównej mierze sezonu grzewczego, co świadczy o tym, iż kotły grzewcze eksploatowane w budynkach jedno i wielorodzinnych, a także strategicznych wpływają w sposób znaczący na końcowy indeks jakości powietrza w Polsce. Do dalszej analizy podjęto kroki w celu określenia jakimi rodzajami źródeł ciepła, a także nośników energii zasilane są powyższe obiekty.

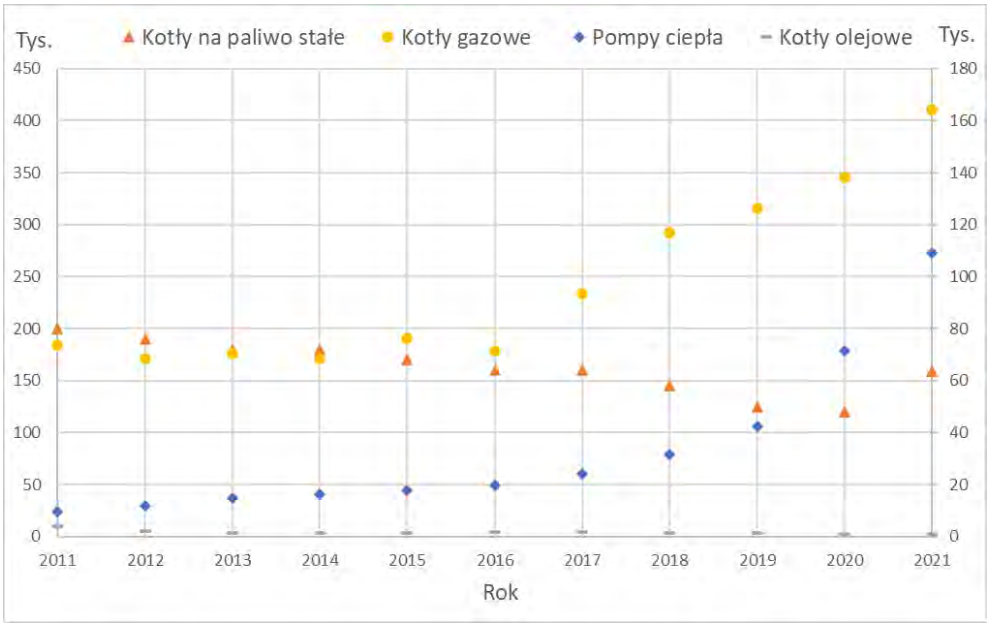
4. AKTUALNA SYTUACJA RYNKOWA SYSTEMÓW GRZEWCZYCH W POLSCE

Celem konfrontacji wpływu wykorzystania systemów zasilania obiektów w energię cieplną, podjęto również analizę sprzedaży urządzeń grzewczych na przełomie lat 2011 – 2021 z uwzględnieniem podziału na różne nośniki energii pierwotnej. Do analizy posłużono się rejestrem danych Stowarzyszenia Producentów i Importerów Urządzeń Grzewczych (SPIUG) w Polsce. Stowarzyszenie zrzesza wiodących producentów i importerów urządzeń grzewczych wszelkiego rodzaju w zakresie małej mocy, jak i średniej powyżej 50 kW. Raport wskazuje sytuację ogólną rynku grzewczego w Polsce, jednakże końcową emisję i poziomy stężeń substancji szkodliwych w powietrzu atmosferycznym stanowią wszystkie urządzenia grzewcze, również te istniejące, których w roku 2020 było około 3 milionów, zgodnie z raportem z działalności Polskiego Alarmu Smogowego (PAS) [PAS, 2020]. W większości przypad-

ków są to kotły na paliwa stałe, głównie zasilane węglem kamiennym lub brunatnym, rzadziej drewnem i biomasą. Dodatkowo bardzo duży odsetek stanowią kotły z ręcznym zasypem bez certyfikacji, do których użytkownicy mogą dostarczyć wszystko, również nieprzeznaczone do spalania odpady. Z technicznego punktu widzenia są to urządzenia pozaklasowe w odniesieniu do normy regulującej minimalne parametry techniczne oraz emisyjne i cieplne [PN-EN 303-5], a także do ekoprojektu [Rozporządzenie (UE) 2015/1189, 28.04.2015].

Analizę urządzeń grzewczych skupiono na wybranych rodzajach ze względu na źródła pierwotne, tak aby oszacować potencjalny wpływ na zmianę jakości powietrza w Polsce w perspektywie analizowanych lat. Do tego celu wytypowano kotły grzewcze zasilane paliwami stałymi, kotły tradycyjne i kondensacyjne gazowe, kotły tradycyjne i kondensacyjne olejowe, a także pompy ciepła – powietrzne oraz gruntowe.

Zestawienie statystyk urządzeń rzewczych wprowadzonych do obrotu w latach 2011 – 2021, przedstawiono na Rys. 5



Rys. 5. Ilość wprowadzonych urządzeń grzewczych w zależności od nośnika energii

Z analizy ilościowej zaobserwowano, że wybór urządzeń grzewczych był wynikową ekonomii inwestycji, poziomu dofinansowań z programów priorytetowych, indywidualnych upodobań, a także kosztów eksploatacyjnych. Zdecydowany wzrost odnotowano dla kotłów gazowych, w szczególności kondensacyjnych oraz pomp ciepła. Tendencja spadkowa przypadła na kotły olejowe oraz kotły na paliwa stałe,

lecz w roku 2021 zaobserwowano wzrost ich sprzedaży. Może to wynikać z zainteresowania kotłami na biomasę, ale także możliwością otrzymania dofinansowania do kotłów zasilanych węglem kamiennym, tzw. „ekogroszkiem", z programu „Czyste Powietrze", które trwało do końca 2021 roku i obejmowało kotły spełniające 5 klasę pod względem emisji, a także wymagania ekoprojektu.

5. PODSUMOWANIE

Zastępowanie nieefektywnych ekologicznie źródeł ciepła poprzez nisko i zeroemisyjne powoduje stopniowe zmniejszanie poziomów stężeń CO, NO_x, SO_2 w powietrzu co jest zauważalne na przedstawionych wykresach. Szczególnie zauważalne spadki dla SO_2, przy wartościach rocznych oraz nieco mniej CO i NO_x. Co istotne statystyki wykazały zanikanie różnic pomiędzy sezonami grzewczymi oraz letnimi, co wynika bezpośrednio z użytkowania źródeł ciepła i odchodzenia od nieefektywnych ekologicznie nośników, a także pozaklasowych urządzeń o bardzo niskim współczynniku sprawności. Wybór urządzeń grzewczych do zasilania budynków jedno i wielorodzinnych oraz komercyjnych, to suma czynników przede wszystkim takich jak wielkość kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych, a także wydajność urządzeń i programy wsparcia finansowego, które skracają okres spłaty. Przytaczając statystyki z lat 2018 – 2022 w programie priorytetowym „Czyste powietrze" odnotowano ponad 388 tysięcy wniosków o wymianę źródła ciepła, z czego do 31 grudnia 2021 roku ilość kotłów węglowych wyniosła 14,8%, z kolei najwięcej było gazowych kotłów kondensacyjnych – 42,27% oraz pomp ciepła 19,97%. Pozostała ilość to kotły na biomasę – 20,83%, natomiast reszta to ogrzewanie elektryczne, kotły olejowe i przyłączenia do sieci cieplnych.

Z punktu widzenia zasilania obiektów strategicznych oprócz wielkości inwestycji kluczowym jest wybór niezależnego od gospodarki międzynarodowej nośnika energii. Szczególnym przypadkiem będą wszelkie paliwa uzależnione od importu, ze względu na potencjalne problemy w dostawach. Łącząc aspekt niezależności oraz ekologii dobrym kierunkiem zapewniającym bezpieczne zasilanie w energię cieplną obiektów strategicznych będą zeroemisyjne pompy ciepła oraz duży udział autokonsumpcji poprzez instalację ogniw fotowoltaicznych, które pozwalają na magazynowanie energii w cieple lub akumulatorach. Ceny samych nośników w odniesieniu do kwh są również przesycone coraz szybszą zmiennością co skutkuje wyborem alternatywnych źródeł energii i trend rosnący. Dzięki szeregom uchwał i rozporządzeń, które wycofują wysoceemisyjne źródła ciepła, jakość powietrza w odniesieniu do SO_2, CO, NO_x ulega ciągłej lecz nieznacznej poprawie. Problemem wciąż obecnym jest ubóstwo energetyczne, czyli rosnące ceny paliw oraz przede wszystkim brak możliwości inwestycyjnych większości użytkowników kotłów nieefektywnych ekologicznie oraz ich zła eksploatacja. Jakość powietrza oprócz gazowych substancji szkodliwych, zawiera także inne silnie kancerogenne substancje takie jak cząstki

stałe PM 2.5, PM 10 oraz w nich zawarte wielopierścieniowe węglowodory aromtaczne (WWA), w tym również benzo(a)piren, który generowany jest głównie w spalinach z kotłów grzewczych pozaklasowych.

Mimo szeregu działań, problem nie został pokonany, gdyż z ponad 3 milionów pozaklasowych kotłów grzewczych istniejących w polskich budynkach wymienionych zostało niespełna 400 tysięcy przez 4 lata. Dlatego rozwiązania należy upatrywać w modernizacji systemowych instrumentów wsparcia finansowego dla zrównoważenia możliwości wykonania inwestycji, również w rejonach najuboższych.

LITERATURA

Artykuły w czasopismach

1. Badyda A., Grellier J., Dąbrowiecki P., 2016, Ocena obciążenia wybranymi chorobami układu oddechowego i układu sercowo-naczyniowego z powodu zanieczyszczeń powietrza w 11 polskich aglomeracjach, Lekarz Wojskowy, 94(1),s. 32 – 38
2. Ciupek B., Gołoś K., 2020, Concentration of Nitrogen Oxides when Burning Wood Pellets of Various Origins, Journal of Ecological Engineering, 21(5), s. 229 – 233
3. Ciupek B., Judt W., Gołoś K., Urbaniak R., 2021, Analysis of Low-Power Boilers Work on Real Heat Loads: A case of Poland, Energies, 14(11), 3101
4. Ciupek B., Just W., Urbaniak R., Kłosowiak R., 2019, The Emission of Carbon Monoxide and Nitrogen Oxides from Boilers Supplied by a Pellet under the Influence of Changes in the Air-Fuel Equivalence Ratio, Journal of Ecological Engineering, 20(10), s. 34 – 38
5. Dąbrowiecki P., Badyda A., Chcialowski A., Czechowski P., Wrotek A., 2022, Influence of Selected Air Pollutants on Mortality and Pneumonia Burden in Three Polish Cities over the Years 2011-2018, Journal of Clinical Medicine, 11(11), 3084
6. El-Sayed Saad A., Khairy M., 2018, An Experimental Study of Combustion and Emissions of Wheat Straw Pellets in High-Temperature Air Flows, Combustion Science and Technology, 190 (2), s. 222 – 251
7. Gołoś K., Ciupek B., Judt W., Urbaniak R., 2021, Impact of Replacement of solid fuel heating boilers on air quality in Poland in 2000-2020, Przemysł Chemiczny, 1(5), s. 96 – 99
8. Junga R., Wzorek M., Kaszubska M., 2017, Technical and Environmental performance of 10 kW understocker boiler during combustion of biomass and conventional fuels [materiały konferencyjne E3S Web Conf.] 19, 01009
9. Obwieszczenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 2 marca 2021 r. w sprawie polityki energetycznej państwa do 2040r. (M.P. 2021 poz. 264)
10. Pełka G., Wygoda M., Luboń W., Pachytel P., Jachimowski A., Paprocki M., Wyczesany P., Kotyza J., 2021, Analysis of the Efficiency of a Batch Boiler and Emissions of Harmful Substances during Combustion of Various Types of Wood, Energies, 14(20), 6783
11. PN-EN 14211:2013-02: Powietrze atmosferyczne. Standardowa metoda pomiaru stężenia ditlenku azotu i tlenku azotu za pomocą chemiluminescencji.

12. PN-EN 14212:2013-02: Powietrze atmosferyczne. Standardowa metoda pomiaru stężenia ditlenku siarki za pomocą fluorescencji w nadfiolecie.
13. PN-EN 14626:2013-02: Powietrze atmosferyczne. Standardowa metoda pomiaru stężenia tlenku węgla za pomocą niedyspersyjnej spektroskopii w podczerwieni.
14. PN-EN 303-5:2021-09: Kotły grzewcze – Część 5: Kotły grzewcze na paliwa stałe z ręcznym i automatycznym zasypem paliwa o mocy nominalnej do 500 kW – Terminologia, wymagania, badania i oznakowanie.
15. Polski Alarm Smogowy, 2020, Razem o czyste powietrze – Raport z działalności w 2020 roku, Kraków
16. Rozporządzenie Komisji (UE) 2015/1189 z dnia 28 kwietnia 2015 r. w sprawie wykonywania dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/125/WE w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu dla kotłów na paliwo stałe (Dz.U. L 193 z 21.07.2015)
17. Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 11 grudnia 2020 r. w sprawie dokonywania oceny poziomów substancji w powietrzu (Dz.U. 2020 poz. 2279)
18. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 sierpnia 2012 r. w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu (Dz. U. Nr 2012, poz. 1031)
19. Stowarzyszenie Producentów i Importerów Urządzeń Grzewczych, 2021, Raport: Rynek urządzeń grzewczych w Polsce 2021 roku, Warszawa, kwiecień 2022
20. Ustawa z dnia 20 lipca 1991 r. o Inspekcji Ochrony Środowiska (Dz.U. 1991 nr 77 poz. 335)
21. Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001r. Prawo ochrony środowiska, (Dz.U. 2001 nr 62 poz. 627)

ACKNOWLEDGEMENTS

Praca wykonana w ramach Dotacji Statutowej Politechniki Poznańskiej. Projekt badawczy: Analiza procesów termodynamicznych zachodzących w kotłach oraz piecach przemyslowych, nr: 0712/SBAD/5202.

THE PERSPECTIVE OF DEVELOPING HEAT ENERGY SOURCES FOR HEATING BUILDINGS AND STRATEGIC FACILITIES IN THE CONTEXT OF THE LEVEL OF GASEOUS AIR POLLUTANTS

Abstract

An analysis of air quality in Poland in the years 2000-2020 was carried out, together with the comparison of quantitative data on the heating devices introduced to the market. The main gaseous air pollutants from the individual heating sector are nitrogen oxides NO_x, carbon monoxide CO and sulfur dioxide SO_2. Slight declines in pollutant concentration levels have been observed over the years, but of the more than 3 million out-of-class heating appliances, more than 80% are still used in the existing buildings. The conducted analysis made it possible to specify the directions requiring development towards the improvement of air quality and the aspects requiring special attention in terms of ecological safety and energy independence, especially in the case of strategic facilities.

Keywords: air quality, pollutants, fuels, heating

Wiktor HOFFMANN*

WPŁYW EMISJI RAKIET NOŚNYCH NA ATMOSFERĘ ZIEMSKĄ

W artykule przedstawiono rodzaje paliw, wraz ze składem spalin, stosowane w popularnych rakietach nośnych. Wyszczególniono wpływ poszczególnych produktów spalania paliw rakietowych na warstwę ozonową oraz wymuszanie radiacyjne. Dokonano zestawienia wielkości emisji pierwiastków dla różnych rakiet w ujęciach na jeden start, na jedną tonę ładunku oraz na jednego pasażera. Wskazano możliwe kierunki rozwoju napędów kosmicznych.

Słowa kluczowe: rakieta nośna, emisja, warstwa ozonowa, wymuszanie radiacyjne

1. WPROWADZENIE

Silniki rakietowe są specyficzną postacią silnika odrzutowego, który wytwarza ciąg jako reakcję strumienia produktów spalania oraz pracuje bez pobierania masy i energii z otoczenia. Integralną częścią takiego silnika jest zasób paliwa i utleniacza, co umożliwia jego pracę poza atmosferą ziemską. Każda emisja z silnika rakietowego może potencjalnie wpłunąć na globalny klimat. Niektóre składniki spalin, takie jak dwutlenek węgla i para wodna, mają bezpośredni wpływ, zwiększając ilość gazów cieplarnianych w atmosferze. Inne emitowane związki wpływają na globalny klimat pośrednio, poprzez niszczenie warstwy ozonowej. W rozważaniach dokonano analuzy wpływu na środowisko emisji silników różnych rakiet nośnych i paliw rakietowych oraz przedstawiono szacunkowe dane na temat skali zjawiska.

W pierwszej kolejności przedstawione zostały rodzaje stosowanych paliw rakietowych oraz produkty ich spalania. W kolejnym etapie przedstawiono wpływ emisji na zmiany klimatyczne, spowodowane niszczeniem warstwy ozonowej oraz wymuszaniem radiacyjnym. Pokazano także szacunkowe wielkości zjawisk oraz kierunki rozwoju silników rakietowych.

* Instytut Energetyki Cieplnej, Politechnika Poznańska

W artykule skupiono się jedynie na napędach rakiet nośnych statków kosmicznych, służących transportowi towarów i ludzi. Można uznać, że w zastosowaniach militarnych aspekty ekologiczne są brane pod uwagę w ograniczonym zakresie.

2. PALIWA RAKIETOWE

2.1. Rodzaje paliw

W chemicznych silnikach rakietowych, czyli wykorzystujących energię powstałą w wyniku spalania, stosuje się trzy postacie paliw. Często kombinacje paliw i utleniaczy zmieniają się wraz z etapami lotu.

Paliwa stałe są to substancje chemiczne w stanie stałym, które spalają się bez udziału czynników zewnętrznych, czyli bez dostępu do tlenu z atmosfery lub zewnętrznego utleniacza. Jednorodne paliwa stałe składają się głównie z nitrocelulozy oraz rozpuszczalników, np. nitrogliceryny. Niejednorodne paliwa stałe są mechanicznymi mieszaninami paliw i utleniaczy związanych przez lepiszcze w zwartą masę. Paliwa stałe są stosowane m. in. w silnikach pomocniczych promów kosmicznych (SRB – Solid Rocket Booster).

Specyficzną odmianą paliw niejednorodnych są paliwa dwufazowe (hybrydowe) składające się z substancji palnej w stanie stałym oraz ciekłego utleniacza. Jako utleniacze w takich paliwach stosuje się m.in. czysty tlen cząsteczkowy, fluor, a także nadchlorany, azotany i tlenki azotu.

Obecnie najpopularniejszymi paliwami w rakietach nośnych są paliwa z substancją palną w stanie ciekłym.

2.2. Paliwa ciekłe

Wodór, a także jego związki azotowe, spalane z tlenem lub fluorem są bardzo skutecznym paliwem. Jest nietoksyczny i w stanie czystym nie ma właściwości wybuchowych ani nie reaguje z materiałami konstrukcyjnymi, ale problem stwarza niska temperatura konieczna do przechowywania go w stanie ciekłym.

Amoniak (NH_3) jest paliwem o dość niskiej wydajności. W wyniku spalania z tlenem powstają spaliny o dość niskiej temperaturze, do 3000K. Amoniak stwarza problemy eksploatacyjne ze względu na właściwości żrące.

Hydrazyna, czyli związek (H_2N-HN_2), jest wydajnym paliwem i reaguje praktycznie z dowolnym utleniaczem. Posiada właściwości żrące podobne do amoniaku.

RP-1 to wysoko rafinowane paliwo do silników odrzutowych czyli wysoko rafinowana nafta. Po spaleniu wytwarza ono CO_2, parę wodną, NO_x, cząstki stałe i tlenek węgla, który dopala się do CO_2 oraz niewielką ilość zanieczyszczeń z siarki.

RP-1 ma niższy impuls właściwy niż ciekły wodór, ale jest tańsze i stabilniejsze. Paliwo to jest również bezpieczniejsze pod względem prawdopodobieństwa wybuchu od ciekłego wodoru, a także o wiele mniej toksyczne od hydrazyny. RP-1 było wykorzystywane w wielu rakietach nośnych, takich jak Saturn V, Atlas V, Soyuz i Falcon-9.

Paliwa hipergolowe stanowią kombinacje hydrazyny lub jej odmiany, np. monometylohydrazyna. W obecności utleniacza, którym zazwyczaj jest kwas azotowy lub tetratlenek diazotu dochodzi do samoczynnego zapłonu. Są one popularne w silnikach manewrowych, gdzie konieczny jest natychmiastowy zapłon i reakcja. Produkty spalania są podobne jak w przypadku paliwa RP-1. Sama hydrazyna jest silnie wybuchowa i trująca.

Metan jest najprostszym nasyconym węglowodorem. Produktami spalania metanu są CO_2, para wodna i niewielkie ilości NO_x. Czysty metan jest gazem cieplarnianym o potencjale cieplarnianym kilkudziesięciokrotnie większym niż CO_2.

2.3. Składniki spalin

Nieorganiczne związki chloru oraz cząstki aluminium są głównym produktem spalania niejednorodnych paliw stałych. Przybliżony skład spalin można określić, przeliczając masę stałego paliwa na masę tlenku glinu (Al_2O_3) oraz kwasu solnego (HCl), ponieważ te dwie substancje są dominujące. Pozostała masa to spoiwo, zazwyczaj polimer syntetyczny na bazie polibutadienu lub poliuretanu. Ponieważ paliwa stałe były używana przede wszystkim w silnikach pomocniczych, emisja ograniczała się tylko do troposfery, skąd jest wypłukiwany przez deszcz i tym samym ma niewielki wpływ na ozon stratosferyczny.

Ilość wytworzonego dwutlenku węgla zależy w dużej mierze od zastosowanej kombinacji paliwa i utleniacza. Paliwa węglowodorowe, takie jak nafta lub RP-1 składają się z długich łańcuchów węglowodorów, które utleniają się, tworząc dwutlenek węgla i parę wodną.

Cząstki stałe pochodzą z nieutlenionego węgla zawartego w paliwie. Wielkość ich emisji jest mniejsza dla nowszych silników. Jednakże stosunkowo nowe silniki Merlin pracujące na bogatych mieszankach paliwowych emitują cząstki stałe na poziome porównywalnym z silnikami starych typów.

Ilość wytworzonej pary wodnej również zależy od konfiguracji paliwa i utleniacza. Paliwa węglowodorowe, które utleniają się, tworząc dwutlenek węgla i parę wodną. Para wodna uwalniana w troposferze utrzymuje się przez krótki czas i włącza się w naturalny cykl hydrologiczny. W stratosferze pozostaje ona znacznie dłużej.

Siarka jest zanieczyszczeniem paliwa naftowego. Na 1 kg paliwa RP-1 przypada 0,03 g siarki. Siarka utlenia się podczas spalania paliwa, tworząc siarczan H_2SO_4.

Dopalanie jest głównym czynnikiem produkcji tlenków azotu (NO_x) ze spalin. Ogólnie rzecz biorąc, wszystkie paliwa wytwarzają tlenki azotu poprzez dopalanie się w troposferze, gdzie jest duża gęstość azotu atmosferycznego. W stratosferze tylko pojazdy produkujące spaliny z paliw na bazie azotu wytwarzają znaczne stężenia NO_x.

Niespalone paliwo, w postaci czterotlenku azotu, nie wpływa znacząco na stężenie NO_x w spalinach.

3. WPŁYW NA ZMIANY KLIMATYCZNE

3.1. Niszczenie warstwy ozonowej

W skutek procesów katalitycznych w obecności nieorganicznych związków chloru, cząstek aluminium i tlenków azotu dochodzi do zubożenia warstwy ozonowej [DeSain i Brady 2014]. Źródłem związków chloru i cząstek aluminium są paliwa stałe, natomiast za emisję tlenków azotu odpowiadają przede wszystkim Rosyjskie i Chińskie silniki wykorzystujące paliwo hipergolowe UDMH oraz N_2O_4.

Tlenki azotu, w obecności pary wodnej, prowadzą do katalitycznego rozpadu ozonu. Badania [Ross et al. 2014] pokazują, że dziesięć startów Rosyjskiej rakiety typu Proton, w ciągu jednego roku, powoduje zmniejszenie warstwy ozonowej o $1{,}2 \cdot 10^{-4}$ %.

Obliczony [Danilin et al. 2001] spadek ilości ozonu, spowodowany emisją 550 ton HCl w stratosferze, jako skumulowany efekt dziesięciu wystrzeleń rakiety Ariane 5 rocznie, w ciągu 20 lat doprowadziłby do utraty 0,1-0,14 % ozonu.

Prognozowana [Danilin et al. 2001] całkowita globalna utrata ozonu, spowodowana emisją cząstek aluminium, może wynieść do $2{,}8 \cdot 10^{-3}$ %. Co ważne, wielkość cząstek jest zależna i proporcjonalna do wielkości silnika [Ross et al. 2014]. Znaczący wpływ na rozpad warstwy ozonowej mają cząstki aluminium o rozmiarach 0,01 – 1 [μm], ponieważ tylko one będą utrzymywały się w stratosferze przez jeden do czterech lat.

Przewidywany [Ross, et al. 2014] wpływ emisji H_2O w postaci pary wodnej, pokrywa się z rzeczywistą, średnią, utratą ozonu i wynosi $1{,}0 \cdot 10^{-5}$ % rocznie z ogólnoświatowych wystrzeleń.

3.2. Wymuszanie radiacyjne

Wymuszanie radiacyjne, czyli zmiana bilansu promieniowania w atmosferze związana z zaburzeniem w systemie klimatycznym, polegającym na powstaniu różnicy między energią promieniowania przychodzącego i wychodzącego w danym systemie klimatycznym. Gazy cieplarniane pochłaniają i emitują promieniowanie podczerwone, i bezpośrednio wpływają na powstawanie zjawiska. W przypadku dobrze wymieszanych gazów cieplarnianych, takich jak dwutlenek węgla, wymuszanie radiacyjne jest proporcjonalne do zmiany klimatu [DeSain i Brady 2014]. Przyczyny wymuszeń pochodzenia antropogenicznego stanowią 98% [Myhre G. et al. 2013] wszystkich wymuszeń, zarówno naturalnych jak i tych związanych z działalnością człowieka.

Stosunek rocznego wzrostu ilości atmosferycznego CO_2 do emisji CO_2 wynosi średnio około 60%. Dwutlenek węgla ma długi czas przebywania w atmosferze, dzięki czemu CO_2 emitowany z rakiety nośnej jest dobrze wymieszany z atmosferą. Całkowita ilość dwutlenku węgla uwolnionego w ciągu ostatnich 28 lat przez wszystkie starty na świecie wyniosła 397833 ton. Wymuszanie radiacyjne z globalnych startów w ciągu ostatnich 28 lat wynosi w przybliżeniu 0,46 $[\mu W/m^2]$ tylko dla CO_2.

Czas utrzymywania się pary wodnej w stratosferze wynosi od 1 do 6 lat i ma bezpośredni wpływ na ocieplenie. Para wodna jest produkowana przez cały czas działania silnika rakietowego i dlatego odkłada się ona w dolnej stratosferze, a także w górnej stratosferze i poza nią.

Na koniec 2013 roku, do stratosfery zostało dostarczonych około 62260 ton pary wodnej z ogólnoświatowych startów. Wymuszanie radiacyjne spowodowane parą wodną wynosi 0,3 $[\mu W/m^2]$. Zaobserwowano także, że para wodna emitowana w górnych warstwach atmosfery zwiększa chmury mezosferyczne, szczególnie w regionie polarnym. Chmury mezosfery zaobserwowano w rejonie bieguna letniego w ciągu kilku dni po wystrzeleniu, szczególnie po wystrzeleniu promu kosmicznego, ponieważ wielkość pióropusza spalin wahadłowca jest większa niż w jakiejkolwiek innej rakiecie nośnej, a para wodna jest głównym produktem spalania paliwa głównych silników.

Aerozole siarczanowe (sulfatowe), wytwarzane przez utlenianie zanieczyszczeń siarkowych w nafcie rakietowej, mają tendencję do powodowania ujemnego wymuszania radiacyjnego, ponieważ rozpraszają przychodzące promieniowanie słoneczne. W latach 2000-2009 rakiety nośne wyprodukowały średnio 0,05 tony siarki [DeSain i Brady 2014]. Ilość SO_x nagromadzonych w atmosferze wyniosłaby 0,2 tony przy założeniu 4-letniego okresu lotów, co odpowiada za -0,09 $[\mu W/m^2]$ wymuszenia radiacyjnego.

Określenie wymuszania radiacyjnego spowodowanego emisją tlenków azotu NO_x jest skomplikowane. Na niższych wysokościach reakcje NO_x powodują zwiększanie ilości ozonu w atmosferze i zmniejszanie ilości metanu. To znaczy, że dochodzi zarówno do zwiększania wymuszania radiacyjnego poprzez tworzenie ozonu troposferycznego, jak i jego zmniejszania poprzez niszczenie metanu. Ponad to tworzenie ozonu jest ściśle powiązane z lokalnymi warunkami atmosferycznymi. Średnie roczne uwalnianie NO_x w troposferze od światowych startów w latach 1985-2013 wyniosło 89 ton. Powoduje to wymuszanie radiacyjne tworzenia ozonu troposferycznego przez rakiety nośne na całym świecie o szacowanej [DeSain i Brady 2014] wartości 0,15 $[\mu W/m^2]$. Rakiety nośne emitują NO_x w całej troposferze. W związku z tym używanie liczb opartych na emisjach naziemnych może powodować pewne błędy. Ilość generowanych cząstek NO_x w troposferze, z paliw nie zawierających azotu, szybko spada wraz z wysokością dla rakiet nośnych, więc w przypadku wielu rakiet zdecydowana większość NO_x jest generowana blisko poziomu gruntu. Rzeczywiste wymuszanie radiacyjne z formowania się ozonu w troposferze jest prawdopodobnie nieco większe niż to określone na podstawie jedynie szacunków naziemnych.

Ze względu na różnicę stężeń gazów w stratosferze i troposferze, NO_x, który jest emitowany w stratosferze, będzie uczestniczył w reakcjach ClO_x-NO_x-O_3CH_4-OH_x, których produkty niszczą ozon w stratosferze. Między szerokościami geograficznymi 60°S i 60°N wynosiła średnio około 2,6% na dekadę [DeSain i Brady 2014]. Wymuszanie radiacyjne z ozonu stratosferycznego przez NO_x emitowane, z ogólnoświatowych startów rakiet nośnych,w ciągu ostatnich 28 lat wynosi około -43 [$\mu W/m^2$] [Ross, et al. 2014].

Emitowane w stratosferze związki nieorganicznego chloru (głównie HCl) biorą udział w katalitycznym niszczeniu ozonu. Między szerokościami geograficznymi 60°S i 60°N, ubytek ozonu stratosferycznego wynosi średnio około 2,6% na dekadę. Wymuszanie radiacyjne z ozonu stratosferycznego przez emisje Cl_x,z ogólnoświatowych startów od 1985 do 2013 roku wynosi około -2,0 [$\mu W/m^2$].

W stratosferze emitowane cząstki tlenku glinu biorą udział w katalitycznym niszczeniu ozonu. Ubytek ozonu, między szerokościami geograficznymi 60°S i 60°N wynosił średnio około 2,6% na dekadę. Szacowane [Ross, et al. 2014] (skorygowane o rzeczywiste uwolnienie tlenku glinu) wymuszanie radiacyjne z ozonu stratosferycznego powodowane przez emitowane cząstki tlenku glinu z ogólnoświatowych startów rakiet nośnych w ciągu ostatnich 28 lat wynosi około -1,3 [mW/m^2].

Emitowana w stratosferze para wodna bierze udział w katalitycznym niszczeniu ozonu. Ubytek ozonu stratosferycznego między szerokościami geograficznymi 60°S i 60°N wynosił on średnio około 2,6% na dekadę [DeSain i Brady 2014]. Wymuszanie radiacyjne z ozonu stratosferycznego przez emitowaną parę wodnej z rakiet nośnych na całym świecie, w ciągu ostatnich 28 lat wynosi około -2,7 [$\mu W/m^2$].

Emisje cząstek stałych węgla także mają wpływ na ocieplenie atmosfery. W ciągu ostatniej dekady wyniosły one ok. 91 ton rocznie. Obliczono 400 ton emisji cząstek stałych z użytkowania rakiet nośnych, w ciągu ostatnich 28 lat, a to daje wymuszanie radiacyjne około 2,4 [mW/m^2].

3.3. Podsumowanie

Większość danych na temat ilości emitowanych cząstek jest nieścisła. Kolejne raporty różnią się podawanymi ilościami, co spowodowane jest niedostateczną ilością danych oraz często błędnymi warunkami brzegowymi przyjętymi w stosowanych modelach matematycznych [DeSain i Brady 2014]. Jest wyraźna potrzeba, aby badać to zagadnienie za pomocą bardziej rygorystycznego podejścia naukowego z wykorzystaniem najaktualniejszych metod i modeli atmosfery.

4. WIELKOŚĆ EMISJI W RÓŻNYCH UJĘCIACH

Do porównania ilości emitowanych cząstek, podczas pojedynczych misji, zostały wybrane najpopularniejsze rakiety nośne, służące transportowi ludzi i towarów, wykorzystujące różne kombinacje paliw. Na podstawie szacunkowych danych [Kordina 2020] przygotowano zestawienie (Tab. 1).

Tabela 1

Porównanie ilości emisji różnych rakiet nośnych

rakieta nośna	paliwo	emisja cząstek [t / 1 start]						
		CO_2	H_2O	cząstki stałe	NO_x	Cl	Al	S
Tytan II	hipergolowe	36	16	0,2	0,3	0	0	0,3
Soyuz FG	RP-1 + hipergolowe	243	64	13	0,4	0	0	0
Atlas V N22	SRB, RP-1 i wodór	259	111	2,1	0,4	21,4	30	0
Falcon 9	RP-1	425	152	30	1	0	0	0
Delta IV Heavy	wodór	0	632	0	0,5	0	0	0
prom kosmiczny	SRB i wodór	443	976	4,2	7	250	350	0
SLS	SRB i wodór	538	1346	5,1	8,5	302,5	423,5	0
Starship + SuperHeavy	metan	2683	2199	0	1,7	0	0	0

Ponieważ rakiety te różnią się rozmiarami i ilością wynoszonego na orbitę ładunku, te same szacunki przedstawiają także emisje w przeliczeniu na jedną tonę ładunku (Tab. 2).

Z wyżej przedstawionych danych widać, że rakiety nośne z silnikami pomocniczymi na paliwo stałe generują duże ilości tlenków azotu, cząstek aluminium (tlenków glinu) i nieorganicznych związków chloru. Dla promów kosmicznych dane wyglądają dość niekorzystnie, ze względu na masę samego promu, który stanowi dodatkowy ciężar do wyniesienia na orbitę. Rakiety napędzane węglowodorami emitują względnie podobne ilości CO_2 i pary wodnej. Rakieta Delta IV Heavy, napędzana wodorem, emituje jedynie parę wodną.

Emisje CO_2, w przeliczeniu na jednego pasażera przedstawiono w tab. 3. Dodatkowo w zestawieniu uwzględniono planowany załogowy start Statku Starship z rakietą nośną Falcon SuperHeavy oraz dwa popularne samoloty pasażerskie.

Tabela 2

Emisja cząstek na jedną tonę wyniesionego ładunku

rakieta nośna	wielkość ładunku [t]	ilość CO_2 [t]	ilość pary wodnej [t]	glin i związki chloru [t]
Tytan II	3,5	10	4	0
Soyuz FG	7	35	9	0
Atlas V N22	13	20	9	4
Falcon 9	15,5	27	10	0
Delta IV Heavy	29	0	22	0
prom kosmiczny	28	16	35	21,7
SLS	95	6	14	7,7
Starship + SuperHeavy	100	27	22	0

Tabela 3

Emisja CO_2 na jednego pasażera

rakieta nośna	liczba pasażerów	ilość CO_2 na 1 pasażera [t]
Soyuz FG	3	81
Atlas V N22	4	64,75
Falcon 9	4	106,25
Starship + SuperHeavy	100	26,83
Boeing 747	416	0,73
Boeing 737	180	0,33

5. KIERUNKI ROZWOJU NAPĘDÓW RAKIETOWYCH

Nowo projektowane silniki rakietowe korzystają wyłącznie z paliw bazujących na wodorze lub węglowodorach. Rosja i Chiny, ukazywane w raportach [DeSain i Brady 2014]. jako główni emiterzy aluminium i związków chloru w XXI w., zrezygnowali ze stosowania paliw stałych i hipergolowych, choć ich główną intencją jest zmniejszenie ryzyka skażenia terenu w razie awarii. Amerykańskie przedsiębiorstwa przemysłu kosmicznego, które podają ochronę środowiska jako jeden ze swoich celów, wykorzystują obecnie metan jako paliwo.

Istnieją koncepcje i prototypy silników wykorzystujących inne rodzaje nośników energii niż paliwa spalane. Silniki jądrowe, których działanie miałoby się opierać na podgrzewaniu i ekspansji wodoru lub niewielkich eksplozjach nie wyszły poza fazy testów. Silniki jonowe, w których jony gazu są przyśpieszane polem elektrycznym,

są wykorzystywane jako silniki manewrowe satelitów, jednak generują zbyt mały ciąg aby unieść rakietę nośną.

6. PODSUMOWANIE

Rakiety nośne uwalniają produkty spalania, podobnie jak inne antropogeniczne działania przemysłowe, jednak w odróżnieniu od nich, emisja ma miejsce w rejonach atmosferyczny, do których nie docierają żadne inne źródła.

Wpływ startów na klimat w chwili obecnej jest niewielki, przy obecnych niskich wskaźnikach ilości startów, jednak ciągły rozwój i zapotrzebowanie na loty kosmiczne sprawił, że zaczęto przywiązywać wagę do stosowanych paliw oraz rozpoczęto szacowanie ich wpływu na zmiany klimatyczne i zanieczyszczenie środowiska. Wyciągnięte wnioski doprowadziły m. in. do zaprzestania stosowania silników na paliwo stałe i hipergolowe, które zostały zastąpione paliwami węglowodorowymi lub wodorem.

Dla wodoru, który emituje jedynie parę wodną, nie uwzględnia się w szacunkach i analizach energii potrzebnej do jego wyprodukowania, której wytworzenie w różny sposób może obciążać środowisko. Wodór stwarza również szereg problemów związanych z przechowywaniem i transportem. Dlatego też, mimo pozornej „czystości", nie jest on uważany za paliwo przyszłości.

Istnieje zapotrzebowanie na rozwój metod dokładnego szacowania i prognozowania wpływu lotów kosmicznych na zmiany klimatu, także z uwzględnieniem procesów produkcji paliwa i skażenia środowiska w razie awarii.

LITERATURA

Artykuły w czasopismach

1. Danilin M. Y. et al., 2001, Global implications of ozone loss in a space shuttle wake, Journal Of Geophysical Research, vol. 106, nr D4, s. 3591-3601, 200, 5, 37–48.
2. Ross, M. N. et al., 2014, Radiative forcing caused by rocket engine emissions, Earth's Future, nr 2, s. 177-196.

Artykuły w materiałach konferencyjnych

1. Myhre G. et al., 2013, Anthropogenic and Natural Radiative Forcing, [materiały konferencyjne Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change], IPCC.

Opracowania i raporty z badań

1. DeSain J. D., Brady B. B., 2014, Potential Atmospheric Impact Generated by Space Launches Worldwide—Update for Emission Estimates from 1985 to 2013, Aerospace Report no. TOR-2014-02140

Komunikaty Internetowe
1. Kordina F., 2020, How much do rockets pollute?, https://everydayastronaut.com/rocket-pollution/ (dostęp 2.04.2022).

LAUNCH VEHICLE EMISSION EFFECT ON THE EARTH'S ATMOSPHERE

Abstract

The article presents the types of fuels, along with the composition of exhaust gases, used in popular launch vehicles. The influence of particular rocket fuel combustion products on the ozone layer and radiative forcing are detailed. A comparison of the emission values for various launch vehicles was made in shots per one launch, per one ton of cargo and per one passenger. Possible directions for the development of drives were also showed.

Keywords: launch vehicle, emission, ozone layer, radiative forcing

Edyta JANEBA-BARTOSZEWICZ*
Jarosław BARTOSZEWICZ**
Wojciech SATKOWSKI***

OCENA WPŁYWU WŁASNOŚCI FIZYKO-CHEMICZNYCH MATERIAŁÓW PĘDNYCH NA BEZPIECZEŃSTWO DZIAŁAŃ W BAZACH LOTNICZYCH

Gospodarka materiałami pędnymi stanowiących zagrożenie w bazach lotniczych i w aktualnych warunkach wymaga uwzględnienia różnorodności rodzju działań i dopasowanych do nich materiałów pędnych. Celem jest osiągnięcie jak największej niezawodności sytemów. Pomimo, że temat ten był już omawiany w artykułach to każde nowe spojrzenie na zagadnienie zwiększa końcowy efekt jakim jest podniesienie skutechności działań. Praca wskazuje na elementy mogące ogrniczać skuteczność działań obejmujących działy magazynowe dostosowane do prechowywania materiałów niebezpiecznych, a w szegulności magazynowania materiałów pędnych o charakterze fizyko-chemicznym. Przedstawiona analiza danych obejmuje różne systemy transportu lotniczego.

Słowa kluczowe: materiały pędne, magazynowanie paliw, własności fizykochemiczne paliw

1. WPROWADZENIE

Wszystkie rozwinięte gospodarki na świecie od wielu lat prowadzą badania nadnowymi materiałami pędnym oraz logistyką ich wykorzystania w celu osiągnięcia oczekiwanych celów. Cele te zależnie od przeznaczenia środków transportu są zróżnicowane. Przelot samolotu możliwy jest dzięki paliwu ciekłemu, transport paliwa ciekłego odbywa się za pomocą transportu lotniczego, drogowego, morskiego i klejowego. Inne to osiągnięcie maksymalnych możliwych ciągów w celu pokonania pierwszej prędkości kosmicznej, osiągnięcia ciągu gwarantującego prędkość większą nisz kontrolowany obiekt, itd. Wszystkie te czynności z jednej stronywymagają stworzenia

* Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu.
** Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki.
*** emerytowany z-ca dowódcy 31. Baza Ltnictwa Taktycznego.

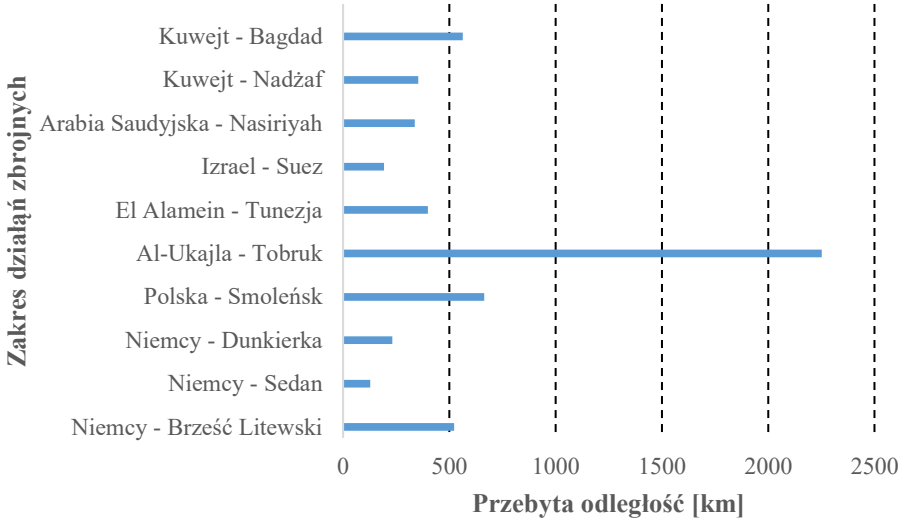
systemów logistycznych o dużej niezawodności, a z drugiej dostosowania parametrów fizyko-chemicznych środków napędowych do przewidywanych zadań. Parametry fizykochemiczne wymuszają różne sposowy: magazynowania, przeładunku, redystrybucji, zasilnia statków powietrznych. Tak rozumiana logistyka odgywają bardzo istotn rolę [Christopher 2000, Christopher i Towill 2002, Christopher 2005, Ciesielski 2009, Coyle et al. 2002, Kara et al. 2014, Manners-Bell 2013, Pfohl 1998]. Z punktu widzenia definicyjnego logistyka ewoluowała i w literaturze przedmiotu nie występuje jedna spójnej definicji. Dlatego zgodnie z [Daneshjo i Štollmann 2013] przytaczają za Logistix Partners definicję logistyki, w której wskazuje się występowanie pewnych ram planowania w zakresie zarzadzania materiałami, usługami, informacjami, itd. Podejście takie mimo ogólności opisu oddaje rzeczywistą rolę logistyki, jej rozumowania i akceptacji zakresu działań. Działania te, zarówno w obszarze wojskowym oraz pozawojskowym, odgrywają i zapewne będą odrywać istotną rolę. Wiąże się to ze zwiększonym zapotrzebowaniem na zwiększanie kuteczności realizacji procedur cywilnych oraz wojskowych. Obejmuje wymagane dzisiaj złożone systemy informacyjne, komunikacyjne oraz kontrolne. Procedury te są złożone i wymagają prowadzenia badań. Według [Bowersox 2009] definicja logistyki w lotnictwie nie ma ograniczeń. Obejmuje ona działania cywilne, jak i wojskowe i nie ma znaczenia własność podmiotów [Abt 1997, Abt 1998]. Jakoprzykład może posłużyć największa bitwia w czasiepierwszwj wwojny światowej. W ciągu siedmiu dni brytyjska artyleria wystrzeliła około 4 milionów pocisków, czyli w przybliżeniu 1200 razy więcej niż w największych bitwach wojny secesyjnej w USA [Satkowski 2016].

2. ANALIZA ZAKRESU STOSOWALNOŚCI ANALIZ LOGISTYCZNYCH

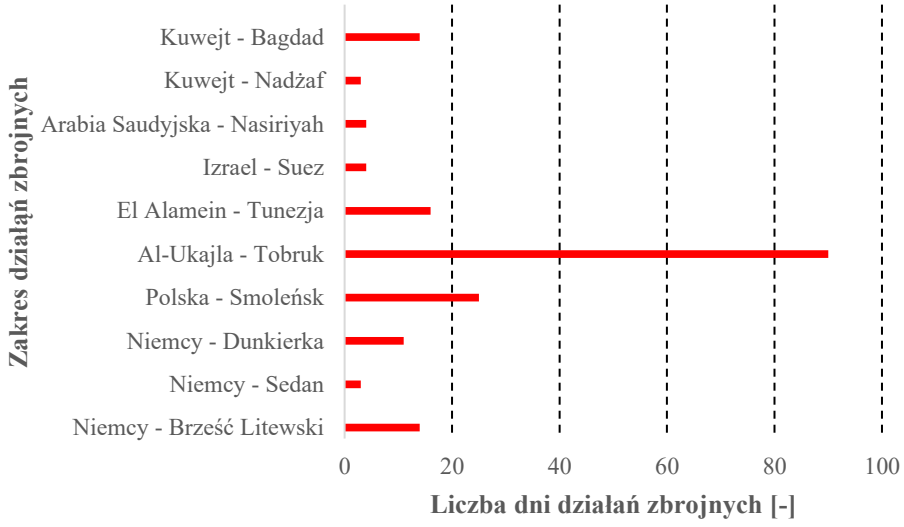
Rodzaj, znaczenie, rola itd. Logistki w przygotowaniu i wykożystaniu zabezpieczeń logistycznych we współczesnych armiach jest zależne od szeregu czynników. Najważniejsze z nich, wg. [Bargłowski 2012, Kaddoussi et al. 2011, Kęsicki 2011, Klechta i Lis 2012, Kurasiński et al. 2014, Michalski 2008, NATO 2012, Pawlisiak 2012, Piggee 2002, 36. [Smith 1999, Szlachta 2007] to:

- szybkie tempo wdrażania nowych generacji uzbrojenia,
- zespolenie prowadzonych działań na ladzie, w powietrzu oraz na morzach (np. poprzez współpracę wojsk aeromoblilnych z innymi siłami lądowymi),
- umożliwienie dowódcom szybką reakcję na całej szerokości i głębokości działań,
- reakcję na wydłużenie się strefy ogniowej oddziaływania przeciwnika,
- duża manewrowość wojsk,
- zakres, czyli rozmachu prowadzonych działań,
- ograniczone możliwości zakupów środków transportowych.

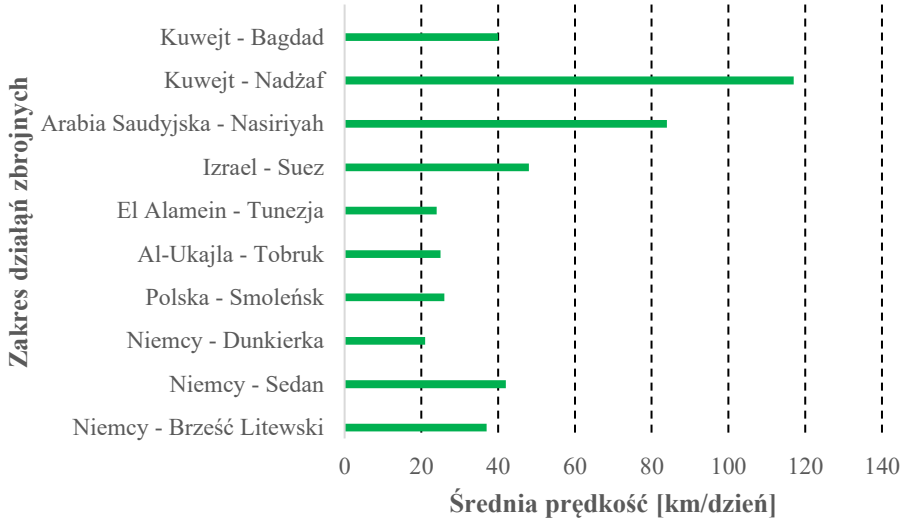
Dowodem na to może być porównanie szybkości przemieszczania się jednostek wojsk w okresie drugiej wojny światowej lub wojny w Iraku. Dane zaprezentowno na Rys. 1-3 [Peltz aet al. 2005].



Rys. 1. Przebyte odległości przez jednostki bojowe w okresie II Wojny świtowej oraz późniejszych konfliktach



Rys. 2. Ilość dni jakie potrzebowały jednostki bojowe na realizacje zadań w okresie II Wojny Świtowej oraz późniejszych konfliktach



Rys. 3. Średnie prędkości przemarszu jednostek Przebyte odległości przez jednostki bojowe w okresie II Wojny świtowej oraz późniejszych konfliktach

Analizując powyższe dane zauważymy pewne współzależności. W przypadku działań w Kuwejcie i Arabii Saudyjskiej przebyte odległości przez jednostki bojowe są niewielki i realizowane są w krótkim czasie. Efektem jest osiągnięcie maksymalnych średnich prędkości. Oznacza to, że zabezpieczenie logistyczne gwarantowao wysoką skuteczność. W przypadku operacji realizowanych w kierunku Tobruku i Smoleńska dystanse niezbędne do pokonania są znacznie większe, czas realizacji zadań wydłuża się, a średnie prędkości maleją. Zważywszy, żę w obu tych misjach warunki realizacji zadania są stabilne w pierwszych okresach istnieje element nie pozwalający na osiągnięcie wysokiej efektywności. Tym czynnikiem jest ponownie sfera logistyczna przygotowania operacji. Podnoszone przez historyków wpywy zmian pogodowych są drugorzędne, gdyż ich wpływ rozpoczyna się od momentu nie zrealizowania w terminie, czyli z dostatecznie dużymi prędkościami średniki celów strategicznych.

W celu skutecznej realizacji zadań konieczne jest dostarczenie w określone miejsce, w określonym czasie wymaganego wyposażenia. Jednym z nich są środki napędowe do sprzętu bojowego oraz wsparcia i zabezpieczenia. Efektem jest duża różnorodność środków napędowych niezbdnych do przetransportowania. Środków które cechują się różnymi własnościami fizyko-chemicznymi. Zdaża się więc, że niektóre materiały napędowe nie mogą być wspólnie transportowane lub wymagają w transporcie specyficznych warunków. Podobnie jak to ma miejsce w przemyśle rolno-sporzywczym, czy farmaceutycznym.

Oznacza to, że znajomość właściwości fizyko-chemicznych jest kluczowe z punktu widzenia bezpieczeństwa magazynowania i transportu środków napędowych.

3. MAGAZYNOWANIE I TRANSPORT PALIW CIEKŁYCH

Paliwa lotnicze można podzielić w różny sposób. Jednym z nich jest stopień zagrożenia jakie niesie ich niekontrolowany wypływ do atmosfery. Należy zaznaczyć, że przypadku paliw lotniczych do cywilnych statków powietrznych ich magazynowanie, transport na pycie portu lotniczego jest nieco inne niż rozwiązania stosowane w Bazach Lotnictwa Wojskowego [Ashford et al. 2013, Graham 2013, Price i Forrest 2016]. Bezwzględu na obszar dziaąń zarówno w działaniach wojskowych, jak i cywilnych kwestią kluczową jest bezpieczeństwo wykonywania operacji lotniczych [Klich 2011, Lewitowicz 2006]. W przypadku magazynowania paliw ciekłych to należy je rozpatrywać w kontekście podziału paliw na dwie kategorie. W przypadku pierwszej z nich magazynowanie np. paliwa F-34 odbywa się w specjalnych zbiornikach: zbiorniki magazynowe główne, zbiorniki magazynowe manipulacyjne i buforowe oraz zbiorniki resztek. Pierwsza grupa to zbiorniki bezciśnieniowe-dwupłaszczowe o pojemnościach od 700 do 2500 m^3. Zastosowanie mniejszej liczby zbiorników o większej pojemności jest podyktowane względnymi utrzymania stabilnej jakości paliwa, a tym samym i bezpieczeństwem lotów. Zbiorniki stosowane w bazach lotniczych to przeważnie zbiorniki o osi pionowej składające się z zewnętrznej obudowy żelbetowej wraz z żelbetowym dachem stałym, szybu centralnego oraz wewnętrznego zbiornika [Satkowski 2016]. Przykładowe dane dla zbiornika o pojemności 2500 m^3: średnica zewnętrzna żelbetowa zbiornika 22,80 m, średnica wewnętrzna stalowa zbiornika 21,85 m, maksymalne ciśnienie robocze 2,5 kPa, minimalne podciśnienie robocze 0,5 kPa, maksymalna temperatura robocza 30^{o}C orza minimalna temperatura robocza -10^{o}C. Zbiorniki te wyposażone są w sytemy monitorujące parametry stanu, wycieki, prasę pomp i zaworów sterujących i zabezpieczających. W przypadku transportu paliwo lotnicze dostarczane jest najczęściej drogą kolejową. Około 44-ech cystern kolejowych o pojemności 50 m^3 pozwalają na napełnienie magazynu do blisko 90%. Rozładunek takiego transportu odbywa się poprzez system rurociągów połączonych ze zbiornikiem bezpieczeństwa. Po rozładunku dodawany jest środek zapobiegający krystalizacji wody w paliwie (S-1745). Proces ten wskazuje na złożoność techniczną procesu magazynowania i przesyłu paliwa oraz co równie istotne na konieczność znajomości własności fizykochemicznycy paiw. Pozwala to, jak w przypadku S-1745 zapewnić całoroczną stabilność paliwa.

W przypadku hydrazyny obiekty magazynowe musza spełniać wymagania jak dla materiałów wybuchowych [Rozporządzenie…, 09.07.2003, Rozporządzenie…, 21.11.2005, Rozporządzenie…, 22.12.2005, Rozporządzenie…, 27.10.2010, Ustawa…, 07.07.1994, Ustawa…, 24.08.1999, Ustawa…, 22.06.2001, Ustawa…,

27.03.2003] musi być to budynek jednokondygnacyjny o konstrukcji murowanej składający się z minimum trzech odrębnych części: pomieszczenia do przechowywania beczek hydrazyny, pomieszczenia do napełniania pokładowych butli hydrazynowych do samolotów np. F-16, pomieszczenie nadzoru i kontroli bezpieczeństwa, pomieszczenia me-dycznego i sprzętu zabezpieczającego, pomieszczeń socjalnych i technicznych. Poszczególne pomieszczenia muszą spełniać rygorystyczne warunki bezpieczeństwa, co do układu wentylacji, klimatyzacji oraz kontroli stężenia oparów hydrazyny.

Transport przygotowanej butli pokładowej z obiektu magazynowego do samolotu F-16 odbywa się w specjalnym kontenerze przyczepą przez specjalistyczny holownik. Przyczepa ta stanowi wyposażenie tzw. „grupy hydrazynowej", będącej podgrupą Grupy Ratownictwa Lotniskowego. Kontener wyposażony jest we wskaźnik wycieku hydrazyny oraz zawór spustowy. Procedura sprawdzania wycieku jest dokonywana przed każdorazowym otwarciem kontenera. Przyczepa wyposażona jest w środki ochrony indywidualnej (maski, aparaty oddechowe, kombinezony, butle z powietrzem), sprzęt niezbędny do usuwania wycieków hydrazyny oraz środki chemiczne do neutralizacji hydrazyny [Satkowski 2016].

4. MAGAZYNOWANIE I TRANSPORT PALIW CIEKŁYCH

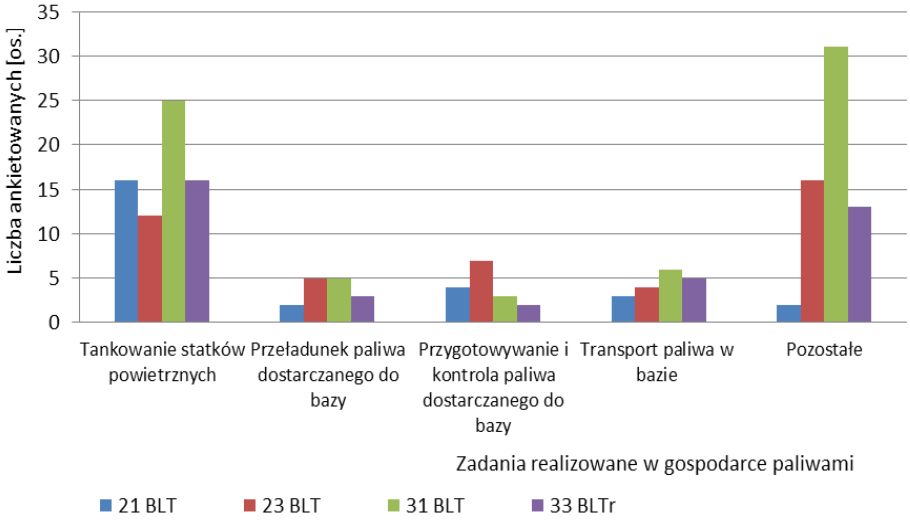
Podstawą oceny wpływu składu paliw jest analiza zaprezentowana w pracach [Satkowski et al. 2014, Satkowski et al. 2015, Satkowski 2016], w których poruszono tematykę bezpieczeństwa baz lotniczych z punktu widzenia różnych czynników oraz różnego personelu. W pracach tych przedstawiono wyniki analiz ankietowych z rozesłanych 162 ankiet z czego: 24 ankiet z 21 BLT, 35 ankiet z 23 BLT, 63 ankiety z 31 BLT oraz 40 ankiet z 33 BLTr. Do dalszej analizy zakwalifikowano 152 ankiety. Zdecydowana większość ankiet wypełniona została przez pracowników mających status żołnierza zawodowego. Zdecydowanie większość ankietowanych osób zaliczanych do zasobów ludzkich gospodarki materiałami niebezpiecznymi deklarowała bezpośrednią realizację zadań, co przekłada się stopień potencjalnego zagrożenia, w przypadku wystąpienia sytuacji niebezpiecznej. W tabeli 1 zestawiono status ankietowanych pracowników z podziałem na żołnierzy zawodowych, pracowników wojskowych, kierujących i nadzorujących zadanie oraz osoby bezpośrednio realizujących zadanie. Zważywszy na fakt, że tylko część z tych osób ma bezpośredni kontakt z materiałami pędnymi, oznacza to że wpływ własności fizyko-chemicznych tych materiałów, dodatków doprowadzanych do paliw oraz warunków przechowywania i ich transportu jest częściowy. W tabeli 1 1 zestawiono strukturę ankietowanych pracowników w poszczególnych bazach lotnictwa wojskowego uwzględniający podział na na żołnierzy zawodowych i pracowników wojska oraz podział na kierownictwo i bezpośredni nadzór oraz realizacja zadań

Tabela 1

Struktura ankietowanych pracowników w poszczególnych bazach lotnictwa

21 BLT				23 BLT				31 BLT				33 BLTr			
żz	pw	kn	br	żz	pw	kn	br	żz	pw	kn	br	żz	pw	kn	br
19	1	5	15	31	4	1	34	50	12	8	54	34	1	9	2
żz - żołnierz zawodowy, pw - pracownik wojskowy, kn - kierójący i nadzorujący, br - bezpośrednio realizujący zadanie															

Ankietowani pracownicy wojska i żołnierze zawodowi stanowią największą grupę osób, czyli blisko 50%. Za główne zadania zaliczyć należ tankowanie statków powietrznych. W przypadku kolejnych zdefiniowanych zadań, tj. przeładunek paliwa dostarczanego do bazy, przygotowanie i kontrola paliwa dostarczanego do bazy oraz transport paliwa na terenie bazy liczba ankietowanych wahała się w okolicach 10%. Pozostała część, blisko 40%, to osoby nie mające bezpośredniego kontaktu z materiałami pędnymi i ich analizą pod kątem możliwych zagrożeń wynikających z oddziaływań fizyko-chemicznych powinna być pominięta. Zestawienie tych danych przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Struktura zadań realizowanych przez pracowników wojska oraz żołnierzy zawodowych

5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono obszar oceny zagrożenia baz lotniczych oraz wpływu na efektywność ich działania pod kątem zmian właściwości fizyko-chemicznych materiałów pędnych. Do analizy przyjęto dane literaturowe, wcześniej weryfikowane naukowo oraz praktycznie. Dane literaturowych odnoszą się do analizy procesów dotyczących gospodarowania materiałami niebezpiecznymi w bazach lotnictwa wojskowego. Po przeprowadzeniu analiz dostrzeżono lukę w analizach wcześniejszych dotyczących baz lotniczych. Działania zasobów ludzkich w bazach lotnictwa wojskowego obejmujące gospodarkę materiałami niebezpiecznymi są uzależnione od scenariuszy działań sił zbrojnych, a na ich skuteczność mają wpływ własności fizyko-chemiczne materiałów pędnych. Poziom odczuwanego zagrożenia przez pracowników wojskowych i żołnierzy zawodowych jest związany z rodzajem eksploatowanych statków powietrznych, a tym samym rodzajem środków napędowych w nich stosowanych. W gospodarce materiałami niebezpiecznymi w różnych scenariuszach działania największe znaczenie odgrywa doświadczenie zasobów ludzkich powiązane z umiejętnościami.

LITERATURA

1. Abt S., 1997, Systemy logistyczne w gospodarowaniu. Teoria i praktyka logistyki. Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Poznaniu, Poznań.
2. Abt S., 1998, Zarządzanie logistyczne w przedsiębiorstwie. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa.
3. Ashford N.J., Stanton H.P.M., Moore C.A., Coutu P., Beasley J.R., 2013, Airport Operations, McGrawHill Companies Incorporation.
4. Bargłowski W., 2012, Wynajem długoterminowy - nowa forma pozyskiwania pojazdów. Przegląd Wojsk Lądowych, nr 1, s. 42-44.
5. Bowersox D.J., 2009, Supply Chain Logistics Management, McGrawHill Companies Incorporation.
6. Christopher M., 2000, Logistyka i zarządzanie łańcuchem dostaw. Strategie obniżki kosztów i poprawy poziomu obsługi, Polskie Centrum Doradztwa Logistycznego, Warszawa.
7. Christopher M., Towill D.R., 2002, Zarządzanie globalnym łańcuchem podaży, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
8. Christopher M., 2005, Logistics and Supply Chain Management. Creating Value-Adding Networks, Prentice Hall
9. Ciesielski M., 2009, Instrumenty zarządzania łańcuchami dostaw, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne.

10. Coyle J., Bardi E., Langrey C., 2002, Zarządzanie Logistyczne, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa.
11. Daneshjo N., Štollmann V., 2013, Logiostics systems and supply chain management, International Journal of Inetrdisciplinary in Theory and Practice, nr 2, s. 73-76.
12. Graham A., 2013, Managing Airports. An International Perspective, Elsevier.
13. Kaddoussi A., Zoghlami N., Hammadi, S.. Zgaya, H., 2011, An agent-based distributed scheduling for military logistics, Intelligent Systems Design and Applications, 11, p. 59-64.
14. Kara B.Y, Sabuncuoglu I., Bidanda B., 2014, Industrial Engineering: Global Logistics Management, CRC Press.
15. Kęsicki P., 2011, Problemy szkolenia pododdziałów logistycznych, Przegląd logistyczny, nr 2 s. 25-30.
16. Klechta R., Lis A., 2012, Restrukturyzacja logistyki stacjonarnej, Przegląd Wojsk Lądowych, nr 3, s. 16-22.
17. Klich E., 2011, Bezpieczeństwo lotów, Instytut Technologii Eksploatacji - PIB.
18. Kurasiński Z., Juniec K., Pawlisiak M., Woźniak J., Kazimierczak M., Słomiany W., Malinowski Z., Byłeń S., 2014, Kompendium logistyka wojskowego, Szatb Generalny Wojska Polskiego. Zarząd Planowania Logistyki - L4, Warszawa.
19. Lewitowicz J., 2006, Podstawy eksploatacji statków powietrznych. Systemy eksploatacji statków powietrznych, Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych.
20. Manners-Bell J., 2013, Global Logistics Strategies: Delivering the Goods. Kogan Page.
21. Michalski M., 2008, Sposoby realizacji zadań przez pluton wojsk aeromobilnych, Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Oficerskiej Wojsk Lądowych, nr 1, s. 224-233.
22. NATO Logistics Handbook, 2012, NATO-OTAN.
23. Pawlisiak M., 2012, System logistyczny a zadania wojsk, Przegląd Wojsk Lądowych, nr 3, s. 33-38.
24. Peltz E., Halliday J.M., Robbins M.L., Girardini K. J., 2005, Sustainment of Army Forces in Operation Iraqi Freedom Battlefield Logistics and Effects on Operations. RAND Corporation.
25. Pfohl H.C., 1998, Systemy logistyczne. Podstawy organizacji i zarządzania, Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań.
26. Piggee A. F., 2002, Transformation - revolution in military logistics. USAWC Startegy Research Project. U.S. Army War College, Carlisle Barracks, Pennsylvania.
27. Price J.C., Forrest J.S., 2016, Practical Airport Operations, Safety, and Emergency Management. Elsevier.
28. Rozporządzenie Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 9 lipca 2003 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy produkcji, transporcie wewnątrzzakładowym oraz w obrocie materiałów wybuchowych, w tym wyrobów pirotechnicznych [Dz.U. Nr 163, poz. 1577 z późn. zm.]

29. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 21 listopada 2005 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać bazy i stacje paliw płynnych, rurociągi przesyłowe dalekosiężne służące do transportu ropy naftowej i produktów naftowych i ich usytuowanie [Dz.U. 2005 nr 243 poz. 2063]
30. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 22 grudnia 2005 r., w sprawie zasadniczych wymagań dla urządzeń i systemów ochronnych przeznaczonych do użytku w przestrzeniach zagrożonych wybuchem [Dz. U. nr 263, poz. 2203]
31. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 27 października 2010 r., w sprawie pomieszczeń magazynowanych i obiektów do przechowywania materiałów wybuchowych, broni, amunicji oraz wyrobów o przeznaczaniu wojskowym lub policyjnym [Dz. U. nr. 222, poz. 1451]
32. Satkowski W., Kiciński M., Bartoszewicz J., 2014, Istota wyznaczania stref bezpieczeństwa dla magazynowych obiektów wojskowych przeznaczonych do składowania niebezpiecznych materiałów wybuchowych, Czasopismo Logistyka, 6, s. 9389-9397.
33. Satkowski W., Kiciński M., Bartoszewicz J., 2015, Analiza lokalizacji stref bezpieczeństwa w obrębie lotniska wojskowego. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej: Wspólne Działanie Nauki Polskiej dla Obronności Kraju, Poznań 29-30.06.2015, Politechnika Poznańska, s. 259.
34. Satkowski W., Kiciński M., Bartoszewicz J., 2015, Analiza problematyki logistyki w bazach lotnictwa wojskowego - transport i magazynowanie paliw lotniczych, Czasopismo Logistyka, 3, s. 4300-4309.
35. Satkowski W., 2016, Gospodarka materiałami niebezpiecznymi w bazach lotnictwa wojskowego w zmiennych warunkach działań, Rozprawa doktorska, Poznań.
36. Smith L.,1999, Commercial Logistics Best Practices for the Revolution in Military Logistics, Army Logistician, 2, p. 33-35.
37. Szlachta A., 2007, Organizacja logistyki w siłach zbrojnych RP, Zeszyty Naukowe - Logistyka i Transport Międzynarodowej Wyższej Szkoły Logistyki i Transportu, 4, s. 77-85.
38. Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r., Prawo budowlane [Dz. U. nr 89, poz. 414 z późn. zm.]
39. Ustawa z dnia 24 sierpnia 1999 r. o ochronie przeciwpożarowej [Dz. U z 2009 r., nr 178, poz. 1380 z późn. zm.]
40. Ustawa z dnia 22 czerwca 2001 r. o wykonaniu działalności gospodarczej w zakresie wytwarzania i obrotu materiałami wybuchowymi, bronią amunicją oraz wyrobami i technologią o przeznaczeniu wojskowym lub policyjnym [Dz. U. nr 67, poz. 679z 2007 r. nr 235 poz. 1700]
41. Ustawa z dnia 27 marca 2003 r. o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym [Dz. U. 2003 nr 80, poz. 717 z późn. zm.]
42. Wang M. Y. D., 2000, Accelerated logistics. Streamlining the Army's Supply Chain. RAND.

ACKNOWLEDGEMENTS

Źródło finansowania: Politechnika Poznańska, 0414/SBAD/3622

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF THE PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF PROPELLERS ON THE SAFETY OF OPERATIONS AT AERONAUTICAL BASES

Abstract

The management of propellants constituting a threat in air bases and in the current conditions requires taking into account the variety of activities and propellants matched to them. The goal is to achieve the highest possible system reliability. Although this topic has already been discussed in the articles, each new look at the issue increases the final effect, which is increasing the efficiency of activities. The work indicates elements that may limit the effectiveness of activities involving warehouse departments adapted to the storage of hazardous materials, and to the storage of physico-chemical propellants. The presented data analysis covers various air transport systems.

Keywords: propellants, fuel storage, physicochemical properties of fuels

Edyta JANEBA-BARTOSZEWICZ*
Bożena KARBOWSKA **

PROCEDURY BEZPIECZNEGO MAGAZYNOWANIA I TRANSPORTOWANIA MATERIAŁÓW ZAKAŹNYCH

Materiały zakaźne sklasyfikowano jako niebezpieczne należące do klasy 6.2, a ich transport reguluje umowa o międzynarodowym transporcie drogowym towarów niebezpiecznych – ADR. Są to materiały posiadające drobnoustroje chorobotwórcze (bakterie, wirusy, pasożyty, grzyby, patogeny) mogące wywoływać choroby u danego organizmu. Zebrane informacje w wybranych placówkach: gabinet weterynaryjny, gabinet stomatologiczny, gabinet kosmetologii estetycznej, salon kosmetyki profesjonalnej pozwoliły na analizę obowiązujących procedur przechowywania i transportu materiałów zakaźnych. Zagrożenia związane z nieprawidłowym przechowywaniem odpadów zakaźnych wynikają niejednokrotnie z wpływu czynników atmosferycznych oraz błędów personelu gabinetów i firm transportujących materiały niebezpieczne.Świadomość konsekwencji wynikających z niestosowania się do zasad pozwala uniknąć sytuacji zagrożenia bezpieczeństwa zdrowia i życia wśród pracowników i klientów.

Słowa kluczowe: materiały niebezpieczne, materiały zakaźne, umowa ADR

1. WPROWADZENIE

Transport polega na przemieszczaniu ludzi, przewożeniu ładunków, przedmiotów za pomocą odpowiednich środków transportu z miejsca A do miejsca B. Czynność ta może być wykonywana przy wykorzystaniu różnych rodzajów transportu, którymi są między innymi transport drogowo-samochodowy, transport śródlądowy, transport kolejowy, transport morski, transport lotniczy i transport rurociągowy. Transport jest jednym z sektorów gospodarki, mający najbardziej negatywny wpływ na otaczające nas środowisko i nasze zdrowie. Europejska Agencja Środowiska (EEA) uznała transport drogowo-samochodowy za najbardziej zanieczyszczający

* Politechnika Poznańska, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych.
** Politechnika Poznańska, Instytut Chemii i Elektrochemii Technicznej

środowisko, oferujący między innymi przewóz materiałów klasyfikowanych jako niebezpieczne [Rogalski, Pyza 2018]. W celu wyeliminowania i ograniczenia do minimum ryzyka zajścia niepożądanej sytuacji podczas ich przewozu, czego następstwem byłoby zanieczyszczenie środowiska lub uszczerbek na zdrowiu osób znajdujących się w pobliżu miejsca zdarzenia, powołana została Międzynarodowa Konwencja [Dz. U. z 2016 r. poz. 1907] dotycząca przewozu ładunków i towarów niebezpiecznych przy użyciu floty transportu drogowego (ADR).

2. UMOWA ADR

2.1. Oznakowanie substancji niebezpiecznych

ADR jest europejską umową regulującą międzynarodowy transport drogowy towarów niebezpiecznych. Została sporządzona w szwajcarskim mieście w Genewie dnia 30 września 1957 roku, gdy funkcję sprawowała Komisja Gospodarcza Narodów Zjednoczonych i zawarta pomiędzy 9 państwami. Umowa ADR podlega nowelizacji co dwa lata, w roku nieparzystym. Polska związała się międzynarodową umową w roku 1975, a całość przepisów obowiązujących została zebrana i załączona do Dz. U. Nr 35, poz. 189 i wprowadzona w życie Rozporządzeniem Ministra Komunikacji i Spraw Wewnętrznych z dnia 2 grudnia 1983 roku w związku z warunkami i kontrolą transportu drogowego towarów niebezpiecznych [Majewski 2007].

Za towar niebezpieczny uznajemy dobro, którego nie możemy przetransportować ze względu na niespełnienie warunków umowy ADR albo dobro spełniające wymagania w niej określone i dopuszczone do przemieszczania się po drodze [Nowacki, Krysiuk i Olejnik 2015].

Zawartość umowy ADR wchodzi w życie zawsze 1 stycznia każdego nieparzystego roku w odstępach dwuletnich. Zaczyna bezapelacyjnie obowiązywać dopiero 1 lipca danego roku co oznacza, że przez pół roku obowiązywania nowej umowy można stosować jej starą wersję bez poprawek. Strukturę stanowi umowa główna, która określa prawne relacje pomiędzy państwami przystępującymi oraz z dwóch załączników A i B. Załącznik A zawiera przepisy ogólne, regulacje dotyczące przede wszystkim opakowania i oznakowania występujących w nim klas materiałów. Załącznik B dotyczy głównie środków transportu, a mianowicie konstrukcji, wyposażenia i eksploatacji pojazdu, który przewozi towar niebezpieczny podczas operacji transportowych. Umowa posiada podział na 13 klas materiałów niebezpiecznych [Dz. U.2021 poz.874]. Przewożone materiały niebezpieczne posiadają numery rozpoznawcze na tablicach przewozowych. Tablica przewozowa posiada wymiary 30x40 cm, jest koloru pomarańczowego z czarną obwódką dookoła i umieszcza się ją na pojeździe przewożącym dany materiał. Na tablicy widnieją dwa oznaczenia liczbowe. W liczniku znajduje się numer rozpoznawczy niebezpieczeństwa (HIN)

i są to dwie lub trzy cyfry. W mianowniku znajduje się numer rozpoznawczy materiału przewożonego (UN). Są to cztery cyfry.

Pierwsza cyfra numeru HIN oznacza zasadniczą właściwość niebezpieczną materiału i jego rodzaj: 2 – gaz, 3 – materiał ciekły zapalny, 4 – materiał stały zapalny, 5 – materiał utleniający, podtrzymujący palenie lub nadtlenek organiczny, 6 – materiał trujący, 8 – materiał żrący.

Powtórzenie cyfry w numerze HIN oznacza spotęgowanie niebezpieczeństwa głównego. Oznaczenie „x" w numerze informuje, że materiał niebezpieczny nie może mieć kontaktu z wodą [Grzegorczyk, Buchcar 2019].

3. KLASYFIKACJA SUBSTANCJI NIEBEZPIECZNYCH

Towary niebezpieczne dzielimy na 13 klas ze względu na zagrożenie, które stwarzają. Każdy z materiałów posiada własny numerem UN i jest kwalifikowany ze względu na stopień stwarzanego zagrożenia do jednej z trzech grup pakowania PG. Numer UN, nazwa wg ADR, klasa przynależności oraz PG pozwalają na identyfikację substancji [Rogalski, Pyza 2018]. W umowie ADR wyróżniamy 13 klas towarów niebezpiecznych [Dz. U.2021 poz.874].

Klasa 1. Materiały wybuchowe i przedmioty z materiałami wybuchowymi

Materiały w stanie stałym lub ciekłym, ewentualnie ich mieszanina, które w wyniku zajścia reakcji chemicznej lub reakcji spalania wydzielają bardzo szybko gazy o temperaturze i ciśnieniu na tyle wysokim, że mogą spowodować zniszczenia w otaczającym środowisku np. (sztuczne ognie, amunicja).

Klasa 1 dzieli się na następujące podklasy:

- Podklasa 1.1 – materiały i przedmioty stwarzające zagrożenie wybuchem masowym, natychmiastowym;
- Podklasa 1.2 – materiały i przedmioty stwarzające zagrożenie rozrzutem, ale nie wybuchem masowym;
- Podklasa 1.3 – materiały i przedmioty, które stwarzają zagrożenie pożarem i małe zagrożenie wybuchem lub rozrzutem albo spełniają oba te zagrożenia, ale nie stwarzają zagrożenia wybuchem masowym;
- Podklasa 1.4 – materiały i przedmioty stwarzające małe zagrożenie w przypadku zapalenia lub zainicjowania podczas przewozu;
- Podklasa 1.5 – materiały o małej wrażliwości, które stwarzają zagrożenie wybuchem masowym, istnieje małe prawdopodobieństwo przejścia od palenia do detonacji w normalnych warunkach przewozu;
- Podklasa 1.6 – materiały niestwarzające zagrożenia wybuchem masowym, bardzo mało wrażliwe.

Klasa 2. Gazy

Zaliczają się do nich czyste gazy, mieszaniny gazów, mieszaniny jednego lub większej ilości gazów z innymi materiałami i przedmiotami je zawierającymi. Do oznaczenia gazów niebezpiecznych stosuje się litery alfabetu: A – duszące, O – utleniające, F – palne, T – trujące, TF – trujące palne, TC – trujące żrące, TO – trujące utleniające, TFC – trujące palne żrące, TOC – trujące utleniające żrące [Rogalski, Pyza 2018].

Klasa 3. Materiały zapalne ciekłe

Są to materiały ciekłe, które spełniają kryterium definicji materiału ciekłego z rozdziału 1.2.1 umowy ADR, a w temperaturze 50°C, prężność ich par nie jest większa niż 3 bary. W temperaturze 20°C nie są całkowicie w stanie gazowym, a ich temperatura zapłonu nie przekracza wartości 61°C. Zaliczają się do nich również materiały ciekłe i stopione materiały stałe o temperaturze zapłonu wyższej niż 61°C, które są dostarczane do przewozu w stanie podgrzanym do temperatury wyższej lub równej niż ich temperatura zapłonu [Fabisiak, Michalak, Kupiński 2010]. Do tej grupy zaliczamy również materiały wybuchowe ciekłe odczulone (rozpuszczone lub zawieszone w wodzie lub innej substancji w celu utworzenia jednorodnej ciekłej mieszaniny o zredukowanych właściwościach wybuchowych).

Klasa 4.1 Materiały zapalne stałe, materiały samoreaktywne, materiały polimeryzujące i materiały wybuchowe odczulone stałe [Dz. U.2021 poz.874].

Zaliczają się do nich:
- materiały łatwo zapalne stałe i przedmioty,
- materiały samoreaktywne stałe lub ciekłe,
- materiały wybuchowe odczulone stałe,
- materiały podobne do materiałów samoreaktywnych,
- materiały polimeryzujące.

Klasa 4.2 Materiały podatne na samozapalenie

Należą do nich materiały piroforyczne wraz z mieszaninami i roztworami, potrzebujące małej ilości dostępu do powietrza do zapłonu w ciągu 5 minut. Do tej grupy zaliczamy materiały i przedmioty samo nagrzewające się wraz z mieszaninami i roztworami, które nie potrzebują energii z zewnątrz, aby ulec samo nagrzewaniu, ale potrzebują do tego powietrza [Pusty 2010].

Klasa 4.3 Materiały wydzielające w zetknięciu z wodą gazy palne

Do klasy 4.3 należą materiały reagujące z wodą z wydzieleniem gazu palnego.

Klasa 5.1 Materiały utleniające

Są to materiały wydzielając tlen mogące spowodować zapalenie lub podtrzymywanie palenia innych materiałów np. nadtlenku wodoru, podchlorynu wapnia.

Klasa 5.2 Nadtlenki organiczne

Są to materiały podatne na rozkład egzotermiczny, mogące doświadczać rozkładu w kontakcie z ciepłem lub zanieczyszczeniami, wskutek tarcia lub uderzenia. Dzieli się ona na dwie podklasy: P1 – Nadtlenki organiczne niewymagające kontrolowania temperatury, P2 –Nadtlenki organiczne wymagające kontrolowania temperatury [Dz. U.2021 poz.874].

Klasa 6.1 Materiały trujące

To substancje, z którymi jednorazowy lub krótkotrwały kontakt, w bardzo małych ilościach, poprzez ich wdychanie, połknięcie itp. może doprowadzić do trwałego uszczerbku na zdrowiu lub nawet śmierci.

Klasa 6.2 Materiały zakaźne

Są to materiały wywołujące choroby, posiadające bakterie, wirusy, pasożyty, grzyby i inne mikroorganizmy np. odpady medyczne. Klasa ta dzieli się na 4 podklasy:
- I1 Materiały zakaźne dla ludzi,
- I2 Materiały zakaźne tylko dla zwierząt,
- I3 Odpady medyczne lub kliniczne,
- I4 Materiały biologiczne.

Klasa 7 Materiały promieniotwórcze

Do tej grupy materiałów zaliczają się materiały wykazujące promieniowanie jonizujące np. materiały rozszczepialne, przedmioty skażone powierzchniowo. Dzielą się na 4 kategorie wyróżniające się inną wartością Wskaźnika Transportowego (TI) i maksymalną wartością poziomu promieniowania [Dz. U.2021 poz.874].

Klasa 8. Materiały żrące

Materiałami żrącymi określamy materiały, które poprzez swój chemiczny skład w przypadku bezpośredniego kontaktu ze skórą powodują nieodwracalne jej uszkodzenia doprowadzając do martwicy, a w przypadku kontaktu z innymi materiałami wywołują ich fizyczne trwałe uszkodzenia. W skład tej grupy wchodzą również materiały, które w połączeniu z wodą tworzą żrącą ciecz. Przykładami takich materiałów są kwas siarkowy, akumulatory [Dz. U.2021 poz.874].

Klasa 9. Różne materiały i przedmioty niebezpieczne

Są to materiały stwarzające zagrożenie, nie kwalifikujące się do żadnej z poprzednich klas [Rzewnicki, Pyza 2016]. Dzielą się na:
- M1 – materiały wdychane w postaci drobnego pyłu mogą stanowić zagrożenie dla zdrowia i życia,
- M2 – Materiały i przyrządy, które w razie pożaru tworzą silnie trujące związki chemiczne zwane dioksynami,
- M3 – Materiały wydzielające pary zapalne,
- M4 – Akumulatory litowe,
- M5 – Przedmioty ratownicze,
- M6 – M8 – Materiały zagrażające środowisku,
- M9 – M10 – Materiały o podwyższonej temperaturze,
- M11 – Inne materiały niebezpieczne, stwarzające zagrożenie podczas przewozu, ale nieznajdujące przynależności do definicji innych klas np. niewybuchy.

4. CHARAKTERYSTYKA MATERIAŁÓW ZAKAŹNYCH

Materiały zakaźne według obowiązującej umowy dotyczącej międzynarodowego przewozu materiałów niebezpiecznych ADR to materiały należące do klasy 6.2 zawierające lub posiadające bardzo wysokie prawdopodobieństwo w swoim składzie mikroorganizmów zwanych patogenami powodujących choroby u danego organizmu. Zaliczają się do nich bakterie, wirusy, mykoplazmy, pasożyty, grzyby oraz drobnoustroje rekombinowane (hybrydy czy mutanty), powodujące choroby i schorzenia u ludzi, a także zwierząt.
W klasie materiałów niebezpiecznych 6.2 wyróżniamy podklasy:
- I1 – Materiały zakaźne dla ludzi,
- I2 – Materiały zakaźne tylko dla zwierząt,
- I3 – Odpady medyczne lub kliniczne,
- I4 – Materiały biologiczne.

Każda podklasa materiałów klasy 6.2 posiada swój czterocyfrowy numer UN, który jest określony nazwą przewozową materiałów zaliczanych właśnie do tego

kodu: I1 – 2814 Materiał zakaźny dla ludzi,I2 – 2900 Materiał zakaźny tylko dla zwierząt, I3 – 3291 Odpad kliniczny nieokreślony I.N.O lub 3291 Odpad (bio) medycznny I.N.O lub 3291 odpad medyczny określony I.N.O lub 3549 odpad medyczny kategorii zakaźny dla ludzi, stały lub odpad medyczny tylko dla zwierząt stały, I4 – materiał biologiczny kategoria B.

Do kategorii A zaliczają się materiały zakaźne, przewożone z dodatkowymi środkami bezpieczeństwa - szczelne opakowania. Fizyczny kontakt z tymi materiałami prowadzi do trwałego uszczerbku na zdrowiu powodując bezpośrednie niebezpieczeństwo zagrażające życiu, śmiertelną chorobę, trwałe upośledzenie, a nawet natychmiastową śmierć.

Do kategorii B wliczają się wszystkie pozostałe materiały zakaźne, nie mieszczące się w kryteriach kategorii A, ich przynależność określa numer UN 3373.

Do grupy materiałów klasy 6.2 nie zaliczają się materiały, nie powodujące chorób u ludzi i zwierząt, nie zawierające patogennych mikroorganizmów lub w których patogeny zostały zneutralizowane i nie są niebezpieczne dla człowieka [Młyńczak 1997].

5. CHARAKTERYSTYKA WYBRANYCH PLACÓWEK MAGAZYNUJĄCYCH MATERIAŁ ZAKAŹNY W CELU PRZEKAZANIA DO UTYLIZACJI

W oparciu o obowiązujące akty prawne przeanalizowano warunki magazynowania i transportu materiałów klasy 6.2 – materiałów zakaźnych w czterech różnych placówkach: gabinecie weterynaryjnym, gabinecie kosmetologii estetycznej, gabinecie stomatologicznym oraz salonie kosmetyki profesjonalnej. Placówki dobrano tak, aby zawierały materiał zakaźny różnego pochodzenia i w różnych ilościach. Zakres i charakter pracy gabinetów był zróżnicowany (usługi medyczne, weterynaryjne, kosmetyczne). Ilość odpadów zależała od ilości wykonywanych zabiegów. Charakterystykę monitorowanych gabinetów zawiera tab.1.

Każdy z gabinetów posiadał aktualną umowę z firmą zajmującą się transportem materiałów zakaźnych. Placówki magazynowały materiał zakaźny zgodnie z zalecanymi procedurami - w specjalnych pojemnikach, odpowiednio oznakowanych, następnie przekazywały do utylizacji przez odpowiednią firmę transportową. Opakowania na odpady zakaźne były jednorazowego użycia, wykonane z wytrzymałego na działanie mechaniczne, wilgoć lub przekłucie czy przebicie tworzywa sztucznego. Rodzaj i ilość odpadów różnił się w zależności od typu usług świadczonych przez gabinet. Koszty świadczenia przez firmę transportową zależały od ilości odpadów i częstotliwości ich odbioru.

Tabela 1

Zakres usług świadczonych przez analizowane placówki

Gabinet weterynaryjny	Usługi weterynaryjne; pielęgnacja, profilaktyka, diagnostyka oraz chirurgia zwierząt domowych
Gabinet kosmetologii estetycznej	Zabiegi kosmetologii estetycznej, upiększającej, pielęgnacyjnej, zabiegi trychologicznej
Gabinet stomatologiczny	Profesjonalne leczenie stomatologiczne, leczenie endodontyczne, ortodoncja, protetyka
Salon kosmetyki profesjonalnej	Usługi z zakresu Kosmetologii, Podologii, Medycyny Estetycznej oraz Makijażu Permanentnego

W tab. 2 przedstawiono szczegółowy opis warunków magazynowania odpadów zakaźnych w poszczególnych placówkach.

5.1. Gabinet weterynaryjny

Gabinet weterynaryjny to bardzo renomowana placówka pomocy dla zwierząt, znajdująca się w centrum miasta. Ilość odpadów zakaźnych jest znacząca. Objętość pojemnika (Rys.1) jest uzależniona od dużej liczby wykonywanych zabiegów, operacji w wyniku, których powstaje duża ilość odpadów medycznych i zakaźnych. Koszt wywozu i utylizacji zależy od wagi odpadów, cena usługi jest relatywnie wysoka.

Rys. 1. Pojemnik na odpady medyczne [Szala 2022]

Tabela 2

Ocena warunków magazynowania materiałów klasy 6.2 w wybranych gabinetach

Rodzaj placówki	Gabinet weterynaryjny	Gabinet kosmetologii estetycznej	Gabinet stomatologiczny	Salon kosmetyki profesjonalnej
Rodzaj pojemników, oznakowanie	- Czerwone, szczelnie zamkniętych pojemniki lub worki oznaczone etykietą, zapełniane maksymalnie do 2/3 ich objętości. -Pojemniki do igieł. - Etykieta na odpady medyczno-zakaźne (rodzaj odpadów, nazwa wytwórcy odpadów, numer REGON, numer Księgi Rejestrowej, Organ Rejestrowy, podpis osoby zamykającej, kod odpadów medycznych, data i godzina otwarcia, data i godzina zamknięcia, ostrzeżenie o maksymalnym napełnieniu pojemnika,			
Rodzaj odpadów zakaźnych	- igły - strzykawki - tkanki zwierzęce - wenflony -waciki zawierające drobnoustroje - rękawiczki	- igły - wenflony - głowice jednorazowe - jednorazowe ostrza - zużyte waciki - rękawiczki - kartridże do mezoterapii mikroigłowej	- ślinociągi jednorazowe - wiertła jednorazowe - ostrza jednorazowe - igły - kubeczki jednorazowe - rękawiczki	-kartridże do mezoterapii mikroigłowej - igły - jednorazowe ostrza - chusteczki i waciki zawierające drobnoustroje (krew)
Warunki przechowywania odpadów	Odpady przechowywane są w chłodni w temperaturze <10°C maksymalnie do 30 dni	Odpady wysoce zakaźne przechowywane są w temperaturze pokojowej do 72h. Po upływie 72h odpady muszą przebywać w chłodni w temperaturze <10°C maksymalnie 30 dni	Materiał zakaźny przechowywany jest w lodówce w temperaturze wynoszącej mniej niż 10°C maksymalnie 30 dni po czym zostają odebrane przez firmę	Odpady zakaźne przechowywane są w chłodni w temperaturze wynoszącej poniżej 10°C przez maksymalnie 30 dni

5.2. Gabinet kosmetologii estetycznej

Gabinet Kosmetologii Estetycznej przeprowadza zabiegi pielęgnacyjne, upiększające, trychologiczne oraz podologiczne. Wykonuje się w nim mniej zabiegów z wykorzystaniem różnego rodzaju igieł lub ostrzy niż w gabinecie weterynaryjnym. Stosowane worki na odpady medyczne i pojemniki na odpady zakaźne są mniejsze (pojemności 1l, 2l, 3l i 5l). Odpady medyczne, zakaźne, wszystkie inne niż igły, ostrza i narzędzia, którymi można się zakłuć lub skaleczyć są gromadzone w czerwonych, odpornych na warunki zewnętrzne i środki chemiczne workach foliowych.

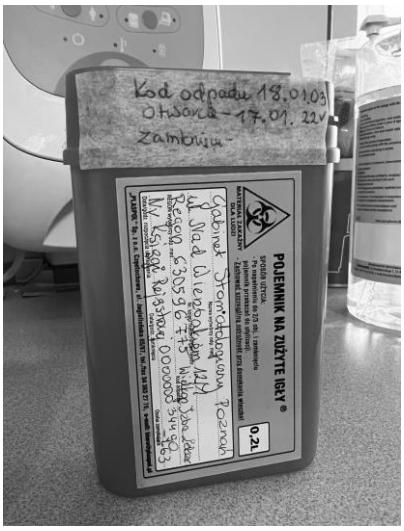
Worki na odpady medyczne umieszczane są w specjalnym koszu, który jest wyposażony w pedał nożny, co pozwala na bezdotykową obsługę pojemnika na odpady (Rys.2). Funkcja ta służy ograniczeniu przenoszenia bakterii, materiału zakaźnego i sprzyja zachowaniu higieny rąk.

Rys. 2. Kosz pedałowy na odpady medyczne [Szala 2022]

5.3. Gabinet stomatologiczny

Gabinet stomatologiczny zajmujący się profesjonalnym leczeniem stomatologicznym, leczeniem endodontycznym, ortodoncją i protetyką gromadzi odpady zakaźne w czerwonych jednorazowych workach oraz odpornych na przekłucia pojemnikach (Rys.3). W gabinecie część stosowanego sprzętu nie jest jednorazowego

użytku i ulega sterylizacji w wysokiej temperaturze i nadaje się do ponownego użytku, co zmniejsza ilość odpadów medycznych.



Rys. 3. Pojemnik na zużyte igły [Szala 2022].

Worki i pojemniki z odpadami medycznymi bądź z materiałem zakaźnym zapełnione w 2/3 objętości zostają odpowiednio opisane m.in. adres, data otwarcia i zamknięcia, kod odpadu, a następnie są przechowywane maksymalnie do 30 dni w chłodni, aż do odbioru przez firmę zajmującą się transportem do utylizacji. Za pomocą wózka odpady są transportowane w okolice samochodu firmy odbierającej odpady, czas kontaktu z materiałem zakaźnym skraca się do minimum.

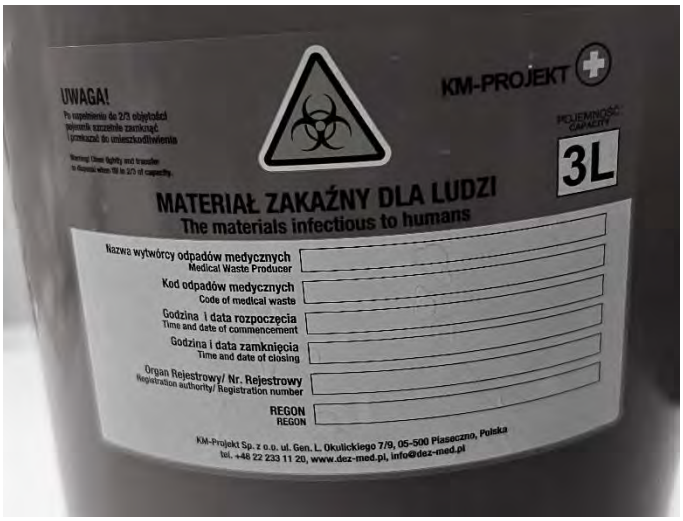
6. ODBIÓR ODPADÓW ZAKAŹNYCH

Odbiór odpadów zakaźnych z placówek wymaga: zachowania szczególnej ostrożności przy zastosowaniu środków ochrony osobistej, ustaleniu najkrótszej drogi z miejsca przechowywania odpadu do samochodu transportującego odpad, umiejscowienia odpadów w odpowiednich zasobnikach, kontrolowaniu ewentualnych uszkodzeń opakowań, sprawdzeniu prawidłowości danych etykiety pojemników (Rys.4), zważeniu odbieranych odpadów i ich sklasyfikowaniu oraz uzupełnieniu dokumentów ewidencyjnych [Kociołek 2010].

Transport materiałów zakaźnych z miejsca odbioru do miejsca utylizacji odbywa się za pomocą firmowego samochodu, który musi posiadać:

a) tablice barwy pomarańczowej,

b) nalepki ostrzegawcze z numerem 6.2,
c) wyposażenie pojazdu określone w instrukcji dla kierowcy ADR.



Rys. 4. Etykieta pojemników z materiałem zakaźnym [Szala 2022].

Osoba transportująca odpowiedzialna jest za sprawdzenie braku zarysowań karoserii pojazdu oraz ładunek, który nie może posiadać wycieków pęknięć lub wybrakowanego zamknięcia. Samochód nie może być nadmiernie załadowany, musi posiada odpowiednie tablice i wymagane oznakowania. Kierowca musi posiadać wymaganą dokumentację przewożonych odpadów oraz określone w instrukcji kierowcy ADR wyposażenie samochodu [Dz. U. z z 2015 r, poz.320, z późn.zm.).

7. PODSUMOWANIE

Materiał zakaźne sklasyfikowano jako niebezpieczne należące do klasy 6.2. Rzetelne przestrzeganie warunków ich magazynowania i transportu jest kluczowe z punktu widzenia zachowania bezpieczeństwa pracy personelu gabinetów, jak i osób zajmujących się transportem.

Analizę oraz ocenę warunków magazynowania i transportu materiałów zakaźnych przeprowadzono na podstawie ankiet i wywiadów uzyskanych po audycie wybranych placówek medycznych o różnym charakterze i specyfikacji pracy.

Z obserwacji funkcjonujących w kraju gabinetów wynika, że nie każdy gabinet przestrzega zasad magazynowania odpadów w sposób minimalizujący wpływ czynników atmosferycznych poprzez przechowywanie odpadów w chłodni oraz szczelne zamykanie pojemników, w celu ograniczania rozprzestrzeniania się drobnoustrojów. Nie we wszystkich placówkach są odpowiednio wypisywane etykiety znajdujące się

na pojemnikach, co może prowadzić do sytuacji, że odpad zakaźny przebywa w miejscu przechowywania dłuższy wymiar czasu niż jest to prawnie dozwolone. Odpad wysoce zakaźny powinien być gromadzony w workach i pojemnikach, których wymiana na nowe nie powinna przekraczać 24 godzin.

Uśrednienie przybliżonego kosztu usługi świadczonej przez przedsiębiorstwo zajmującą się transportem materiałów zakaźnych do utylizacji było utrudnione ze względu na zbyt wiele składowych mających wpływ na cenę usługi m.in. waga odbieranych odpadów, kod odpadu, rodzaj klienta, region, częstotliwość odbioru odpadów, cena paliwa a przede wszystkim rodzaj usług świadczonych przez gabinety.

Zebrane informacje pozwoliły na analizę obowiązujących procedur przechowywania i transportu materiałów zakaźnych. Świadomość konsekwencji wynikających z niestosowania się do zasad bezpieczeństwa wśród pracowników placówek medycznych pozwala uniknąć sytuacji zagrożenia bezpieczeństwa zdrowia i życia wśród pracowników i klientów.

LITERATURA

Pozycje książkowe

1. Grzegorczyk K., Buchcar R., 2019, Przewóz towarów niebezpiecznych ADR.Wydawnictwo ADeR Buch-Car, Błonie.
2. Kociołek K. T., 2010, Drogowy przewóz towarów niebezpiecznych, Wydawnictwo Tarbonus, Warszawa.
3. Młyńczak M.,1997, Analiza ryzyka w transporcie i przemyśle, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
4. Pusty T., 2009, Przewóz towarów niebezpiecznych. Poradnik kierowcy. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa.

Artykuły w czasopismach

1. Fabisiak J., Michalak J., Kupiński J., 2010, System zarządzania jakością w transporcie substancji niebezpiecznych, Logistyka 6/2010, Poznań s.1-14.
2. Majewski P., 2007, Transport towarów niebezpiecznych w świetle nowelizacji umowy ADR, Zeszyty Naukowe WSOW nr 3., s.20-32.
3. Nowacki G., Krysiuk C., Olejnik K., 2015, Zagrożenia i ratownictwo związane z przewozem towarów niebezpiecznych w Polsce, Logistyka [CD2] nr 4, s.8053-8062.
4. Rogalski G., Pyza D., 2018, Organizacja przewozów towarów niebezpiecznych w transporcie drogowym, Prace Naukowe Poltechniki Warszawskiej, z.120, s. 341-363.
5. Rogalski G., Pyza D., 2018, Zagrożenia w transporcie grogowym substancji niebezpiecznych, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, z. 120, s. 351-363.
6. Rzewnicki J., Pyza D., 2016, Wybrane aspekty doboru technologii przewozu materiałów niebezpiecznych w transporcie drogowym, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, nr 111, s. 477-485.

Rozporządzenia

1. Umowa europejska dotycząca międzynarodowego przewozu drogowego towarów niebezpiecznych (ADR), sporządzona w Genewie dnia 30 września 1957 r., (Dz. U. 2021 poz 874).
2. Ustawa z dnia 6 września 2001 r o transporcie drogowym (Dz. U. z 2016 r. poz. 1907, z późn. zm.).
3. Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 15 lutego 2012 r w sprawach świadectwa dopuszczenia pojazdu ADR (Dz. U. z 2015 r., poz.320, z pózn.zm.).
4. Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 15 lutego 2012 r w sprawach egzaminów dla kierowców przewożących towary niebezpieczne (Dz. U. z 2014 r., poz. 304, z pózn.zm.).

Opracowania i raporty z badań

1. Szala G., 2022, Praca inżynierska - Analiza warunków transportu towarów niebezpiecznych na przykładzie materiałów zakaźnych., Politechnika Poznańska.

ACKNOWLEDGEMENTS

Źródło finansowania: Politechnika Poznańska, 0414/SBAD/3622, 0911/SBAD/2204.

PROCEDURES FOR THE SAFE STORAGE AND TRANSPORT OF INFECTIOUS MATERIALS

Abstract

Infectious materials are classified as hazardous, belonging to class 6.2, and their transport is regulated by the agreement on international road transport of dangerous goods - ADR. These are materials with pathogenic microorganisms (bacteria, viruses, parasites, fungi, pathogens) that can cause diseases in a given organism. The information collected in selected facilities: a veterinary office, a stomatological office, an aesthetic cosmetology office, a professional cosmetics salon allowed for the analysis of the applicable procedures for storing and transporting infectious materials. Hazards related to improper storage of infectious waste often result from the influence of weather conditions and the errors of the staff of offices and companies transporting hazardous materials. The awareness of the consequences of non-compliance with the rules allows to avoid situations of health and life threatening among employees and customers.

Keywords: hazardous materials, infectious materials, ADR agreemen

Edyta JANEBA-BARTOSZEWICZ*
Bożena KARBOWSKA

TRANSPORT ŚRODKÓW SPECJALNEGO PRZEZNACZENIA WYKORZYSTYWANYCH W MEDYCYNIE NA PRZYKŁADZIE SZCZEPIONEK PRZECIW COVID-19

Transport leków dotyczy całego szeregu preparatów w różnej postaci. Jakość wyrobów leczniczych wpływa bezpośrednio na zdrowie pacjenta, dlatego procedury związane z dystrybucją preparatów farmaceutycznych muszą być ściśle przestrzegane. Podczas doboru środka transportu do przewozu leków, w tym szczepionek, należy kierować się dokumentacją załączoną do danego preparatu. Każdy nedykament wymaga innych warunków klimatycznych w celu zachowania swoich właściwości.

Przeanalizowano prawne aspekty dotyczące warunków bezpiecznego magazynowania i transportu szczepionek. Szczegółowej analizie poddano jedne z najnowszych preparatów wprowadzonych na rynek - szczepionki przeciw COVID-19.

Słowa kluczowe: szczepionka, postać leku, zimny łańcuch dostaw.

1. WPROWADZENIE

Transport towarzyszy ludzkości od samego początku i zmienia się na przestrzeni wieków, stanowi fundamentalny element każdej dobrze funkcjonującej gospodarki oraz dobrze rozwiniętego społeczeństwa. Dotyczy nie tylko transportu produktów takich jak owoce, warzywa, przedmioty codziennego użytku, ale również przemieszczania się ludzi, transportowania wody, substancji niebezpiecznych, produktów leczniczych, sprzętów medycznych oraz żywych organów.

Ostatnie lata postawiły przed transportem nowe wyzwanie. Pandemia wirusa SARS-Cov2 wymusiła na przemyśle farmaceutycznym intensywne prace nad szczepionkami mającymi na celu zapobieganie rozprzestrzenianiu się chorób COVID-19 wywołanej przez koronowirusa. Dystrybucja ogromnych ilości szczepionek na dużą

* Politechnika Poznańska, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych.
** Politechnika Poznańska, Instytut Chemii i Elektrochemii Technicznej

skalę, w krótkim czasie, wymagała przestrzegania ściśle określonych przez producenta warunków magazynowania i transportowania. Każdy z pięciu preparatów dopuszczonych do obrotu na terenie Unii Europejskiej posiada własny szereg zaleceń wymagających przestrzegania. Idealne skonfigurowanie procesów transportowych szczepionek z utrzymaniem zimnego łańcucha dostaw pozwala na zachowanie niezmiennych właściwości fizykochemicznych i mikrobiologicznych szczepionek.

2. PRAWNE ASPEKTY TRANSPORTU LEKÓW

2.1. Prawo farmaceutyczne

Ustawa z dnia 6 września 2001 roku – Prawo farmaceutyczne określa m.in. warunki obrotu produktami leczniczymi, jednak nie podaje szczegółowych wytycznych odnośnie ich transportowania. Idea zakłada traktowanie wyrobów farmaceutycznych w sposób szczególny - nie mogą być one traktowane w przewozie, tak jak każdy inny ładunek. Ustawodawca wyodrębnia obrót farmaceutykami na hurtowy i detaliczny. Podmioty i przedsiębiorcy zajmujący się obrotem hurtowym produktami leczniczymi muszą zagwarantować płynność i stałość dostaw do podmiotów uprawnionych do obrotu detalicznego i przedsiębiorców zajmujących się obrotem hurtowym w ilości odpowiadającej potrzebom pacjentów [Dz.U 2001 Nr 126 poz.1381].

Obrotem hurtowym są wszelkie działania polegające na zaopatrywaniu, przechowywaniu, dostarczaniu lub eksportowaniu produktów leczniczych, które prowadzone są jedynie przez hurtownie farmaceutyczne lub inne uprawnione podmioty, dysponujące odpowiednimi pozwoleniami, uniemożliwiając przy tym bezpośrednie zaopatrywanie ludności. W tym celu korzysta się z elementów systemu transportowego - komór przeładunkowych zlokalizowanych również poza miejscem prowadzenia hurtowni. Służą one do czasowego przechowywania farmaceutyków w zbiorczych opakowaniach wytwórcy lub w zamkniętych opakowaniach transportowych, w warunkach określonych dla konkretnego produktu oraz zgodnie z wymaganiami Dobrej Praktyki Dystrybucyjnej. Pomieszczenia komór przeładunkowych muszą spełniać wymagania techniczne identyczne jak pomieszczenia hurtowni farmaceutycznych. Okres składowania nie może przekraczać 36 godzin [Dz.U 2001 Nr 126 poz.1381].

Obrót detaliczny to bezpośrednie zaopatrywanie ludności w produkty lecznicze. Prowadzone przez: apteki ogólnodostępne, punkty apteczne, placówki obrotu poza aptecznego np. sklepy zielarsko-medyczne, sklepy specjalistyczne zaopatrzenia medycznego, sklepy ogólnodostępne (sprzedaż produktów leczniczych wydawanych bez recepty). Konsument może zaopatrywać się w leki tylko w aptekach i punktach aptecznych. Nie ma możliwości ich zakupu bezpośrednio od producenta lub hurtownika.

2.2. Dobra Praktyka Dystrybucyjna (DPD)

W trosce o zdrowie i życie pacjenta na branżę farmaceutyczną narzuca się szereg wysokich wymagań jakościowych i prawnych. Ze względu na specyfikację produktów obowiązują szczególne warunki transportu i magazynowania. Wszelkie obowiązujące kryteria zostały zawarte w Rozporządzeniu Ministra Zdrowia w sprawie wymagań Dobrej Praktyki Dystrybucyjnej.

Dobrą Praktyką Dystrybucyjną - DPD (ang. Good Distribution Practice, GDP) jest praktyka, która gwarantuje bezpieczne przyjmowanie, transportowanie, przechowywanie i wydawanie produktów leczniczych. [Dz.U 2001 Nr 126 poz.1381]. Założenia GDP obejmują m.in.:

- zarządzanie jakością (system jakości, zarządzanie działaniami zlecanymi podmiotom zewnętrznym, przegląd zarządczy i monitorowanie, zarządzanie ryzykiem),
- personel (wyznaczenie Osoby Odpowiedzialnej, szkolenia, higiena),
- pomieszczenia i sprzęt (kontrola temperatury i otoczenia, systemy komputerowe, kwalifikacja i walidacja),
- dokumentację,
- czynności zapewniające np. zachowanie tożsamości produktu leczniczego (kwalifikacja dostawców i odbiorców, przyjmowanie produktów leczniczych, przechowywanie i niszczenie, dostawy i ich kompletowanie oraz eksport produktów leczniczych do państw trzecich),
- reklamacje, zwroty, podejrzenia sfałszowania, wstrzymanie i wycofanie produktów leczniczych,
- działania zlecane podmiotom zewnętrznym oraz szczególne warunki dotyczące pośredników w obrocie produktami leczniczymi,
- kontrole wewnętrzne,
- transport (kontenery, pakowanie i etykietowanie, produkty wymagające specjalnych warunków) [Dz.U.2017 poz.509].

Tematyka rozporządzenia dotyczy:

- przedsiębiorców prowadzących obrót hurtowy produktami leczniczymi, z wyłączeniem produktów leczniczych weterynaryjnych,
- pośredników w obrocie produktów leczniczych.

Przedsiębiorcy dostarczający produkty zobowiązani są, by transportowane produkty lecznicze były zabezpieczone przed uszkodzeniem, kradzieżą i fałszowaniem [Dz.U. 2006 poz.1225]. Temperatura przechowywania scharakteryzowana jest przez producenta lub wskazana na zewnętrznym opakowaniu zbiorczym. Jakiekolwiek odstępstwa występujące podczas transportu, takie jak wahania temperatury czy uszkodzenie produktu są niezwłocznie zgłaszane [Dz.U.2017 poz.5]. Na etapie planowania transportu stosuje się podejście oparte na ocenie ryzyka tras dostawy. Ustala się

przypadki, w których kontrola temperatury jest wymagana. Warto posiadać odpowiednie ubezpieczenia np.: OCP – Odpowiedzialność Cywilna Przewoźnika w ruchu krajowym i międzynarodowym, OCS – Odpowiedzialność Cywilna Spedytora, Ubezpieczenie Cargo.

Trasa przewozu obejmuje przechowywanie w komorze przeładunkowej, rozładunek i ponowny załadunek. Wysyłka przeprowadzana jest z miejsca wskazanego w zezwoleniu na prowadzenie hurtowni farmaceutycznej, a produkty dostarczane są jedynie na adres znajdujący się w specyfikacji wysyłkowej. Przedsiębiorca ma prawo zlecić transport podmiotom zewnętrznym. Udokumentowane jest to pisemną umową, określającą warunki przewozu danej przesyłki.

Ustawa zawiera także informacje dotyczące kontenerów, pakowania i etykietowania. Produktom leczniczym należy zapewnić odpowiednią ochronę przed czynnikami zewnętrznymi, a kontenery lub opakowania nie mogą mieć wpływu na ich jakość [Dz.U.2018 poz. 1626]. Kluczowe jest oszacowanie minimalnej i maksymalnej temperatury zewnętrznej oraz czasu transportu wraz z czynnościami przeładunkowymi. Kontenery muszą być zwalidowane. Etykiety na opakowaniach i kontenerach, oprócz możliwości identyfikacji ich zawartości i ustaleniu pochodzenia produktów, zawierają informacje dotyczące wymogów postępowania i przechowywania oraz środków ostrożności zapewniając farmaceutykom stałe zabezpieczanie.

2.2. Farmakopea Polska

Produkt leczniczy wprowadzany na rynek wymaga sprawdzenia skuteczności, bezpieczeństwa oraz czystości chemicznej i mikrobiologicznej. Farmakopea, zwana również kodeksem aptecznym, jest zbiorem wymagań odnoszących się do jakości oraz metodyki badań produktów leczniczych. Zawiera monografie produktów, wykorzystywanych materiałów, surowców oraz opakowań. Opisuje standardy jakie muszą zostać spełnione w celu wejścia na rynek danych medykamentów. Pierwszy zbiór wymagań powstał aż w 1817 roku. Farmakopea Europejska jest tworzona aż przez 8 państw i ma ponad 57 lat. Farmakopea, co kilka lat jest publikowana w formie uaktualnianych wydań.

Kodeks zawiera zbiór informacji na temat poszczególnych produktów leczniczych niezależnie od postaci: definicje, sposób wytwarzania preparatu, badania jakościowe, ilościowe i czystości oraz wskazówki dotyczące przechowywania i magazynowania.

3. ŚRODKI TRANSPORTU WYKORZYSTYWANE W PRZEMYŚLE FARMACEUTYCZNYM

DPD ze względu na określoną temperaturę i wilgotność przewozu farmaceutyków rekomenduje wykorzystanie do tego celu pojazdów chłodniczych, które neutralizują ryzyko wystąpienia zagrożenia związanego z brakiem wymaganych parametrów. Pojazdy te są szczegółowo opisane w Umowie o międzynarodowych przewozach szybko psujących się artykułów żywnościowych i o specjalnych środkach transportu przeznaczonych do tych przewozów (ATP) [Dz.U. 2015 poz.667].

3.1. Izotermiczne środki transportu

Izotermiczny środek transportu pozwala na ograniczenie wymiany ciepła między wewnętrzną i zewnętrzną powierzchnią nadwozia, dzięki materiałom termoizolacyjnym z których wykonane są ściany, podłoga, dach i drzwi. Izoterma ma za zadanie utrzymanie stabilnej temperatury powyżej 0ºC i zniwelowanie nagłych jej skoków. Zabudowy te, oprócz konstrukcji izotermicznej, mogą być wyposażane w odpowiednio dobrane agregaty chłodnicze oraz w niezależne ogrzewanie przestrzeni ładunkowej, tak by uzyskać temperaturę nawet +25ºC. Wykorzystywane są najczęściej na krótkich i średnich dystansach, przy których wymagane jest zabezpieczanie ładunku przed działaniem warunków atmosferycznych takich jak: pyły, kurz, wilgoć [Bieńczk et al. 2006]. Do izolacji nadwozia używa się pianki poliuretanowej, pianki winylowej lub spienionego polistyrenu. Nadwozia z upływem czasu tracą swoją sztywność i właściwości, przez co nie stanowią skutecznego zabezpieczenia produktów leczniczych. Dużo lepiej sprawdzają się nadwozia izolowane pianką poliuretanową. Jest ona łatwa w obróbce, odporna chemicznie i można ją stosować w szerokim zakresie temperatur. Dodatkowo materiały te zabezpieczane są różnymi okładzinami wewnętrznymi (laminat, blacha ryflowana, wylewka, sklejka) i zewnętrznymi (blacha stalowa, aluminiowa, laminat poliestrowoszklany). Większość izoterm dysponuje możliwością zamontowania agregatu [Piernikarski 2008].

3.1. Środki transportu z niemechanicznym urządzeniem chłodzącym

Lodownia stanowi środek transportu niekorzystający z maszyn mechanicznych w celu utrzymywania temperatury. W celu obniżania temperatury wewnątrz nadwozia, wykorzystywane są źródła chłodu takie jak płyty eutektyczne, lodu naturalnego bądź suchego.

Według umowy ATP konstrukcja lodowni powinna umożliwiać utrzymanie odpowiedniej temperatury przez 12 godzin, nawet przy temperaturze zewnętrznej osiągającej 30°C. W porównaniu do izotermy utrzymującej temperaturę od 0°C do 12°C przez całą podróż, lodownia pozwala transportować farmaceutyki od -20°C do 7°C.

3.1. Środki transportu z mechanicznym urządzeniem chłodzącym

Chłodnia to izotermiczny środek transportu wyposażony w indywidualne lub wspólne urządzenia chłodnicze, pracujące w czasie jazdy i na postoju, umożliwiające w średniej temperaturze +30 ºC obniżenie temperatury wewnątrz nadwozia a następnie utrzymanie jej.

Nadwozia posiadają agregaty chłodnicze mające różnorodne sposoby zasilania:

- wysokoprężny silnik spalinowy,
- elektryczne zasilanie z instalacji pojazdu,
- pasowe – sprężarka napędzana od silnika auta za pomocą pasa,
- hydrauliczne – pompa znajdująca się w układzie napędowym napędza sprężarkę.

Chłodzenie polega na usuwaniu ciepła i wilgotności z wnętrza ładowni na zewnątrz. Agregaty posiadają również funkcje grzania, co wykorzystywane jest przy niskich temperaturach otoczenia [Wojciechowski 2014].

4. CHARAKTERYSTYKA ZIMNEGO ŁANCUCHA DOSTAW

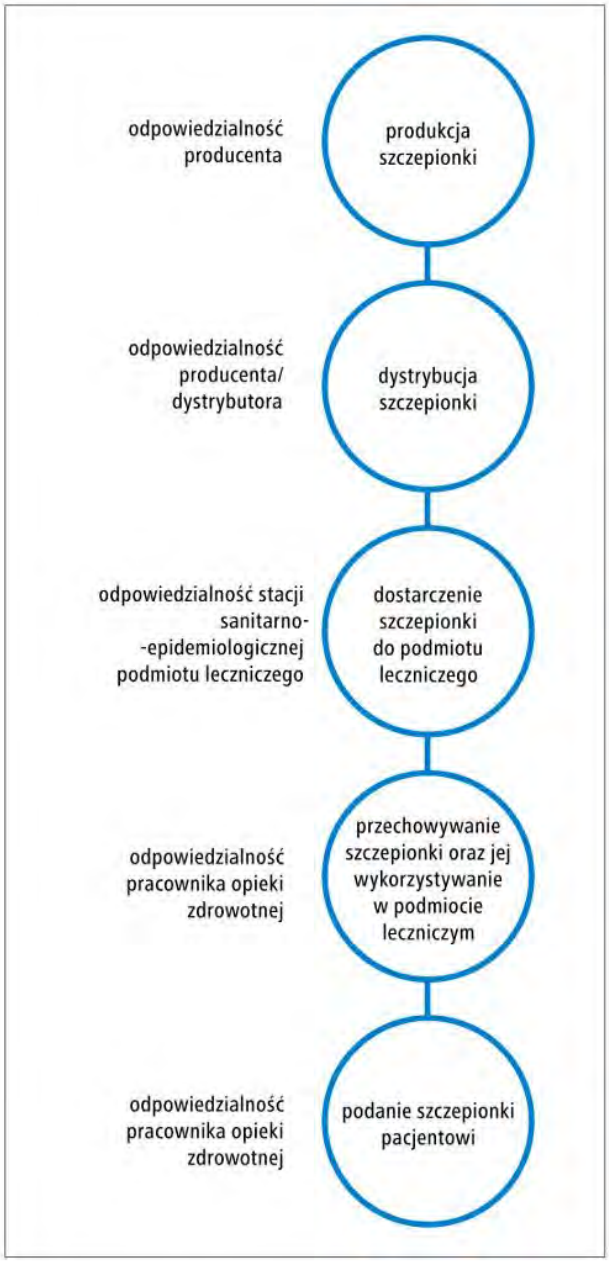
Rozważając transport w temperaturze kontrolowanej mamy do czynienia z zimnym łańcuchem dostaw. Klasyczny łańcuch dostaw to pojęcie bardzo rozległe i zróżnicowane. Składa się z różnych procesów i działań, które dla finalnego odbiorcy stanowią wartość w postaci produktu lub usługi. Kluczową rolę odgrywa transport, magazynowanie i przeładunek. Schemat zimnego łańcuch dostaw przedstawionow w Rys.1 (Fig.1)

Rys. 1. Schemat zimnego łańcucha dostaw [label.pl]

Ze względu na zróżnicowanie klimatu, przede wszystkim podczas transportów międzynarodowych, konieczne jest odpowiednie zabezpieczenie ładunku, by nie stracił on swojej użyteczności. Istnieją ładunki, które ze względu na swoją specyfikację wymagają dodatkowo utrzymania stałej temperatury podczas każdego etapu dystrybucji czyli utrzymania zimnego łańcucha dostaw. Każdy lek różni się od siebie wymaganiami transportowymi i w zależności od tego należy stosować różne metody zabezpieczania ich podczas dystrybucji, a także podczas załadunku czy rozładunku [Witkowski 2013].

Zachowanie ciągłości temperatury podczas transportowania leków oraz szczepionek stanowi niekiedy sprawę życia lub śmierci. Schemat łancucha farmaceutycznego dla szczepionek przedstawia Rys.2 (Fig.2). Nawet chwilowy pobyt preparatu w nieodpowiednich warunkach może przyczynić się do zaniku ich immunogenności. Wstrzyknięcie bądź podanie jakiegokolwiek preparatu leczniczego, który był przechowywany w złych warunkach może prowadzić do powikłań zdrowotnych bądź nawet śmierci. Leki zależnie od swojej postaci inaczej reagują na zmiany temperaturowe, natomiast te które przyjmują formę płynną są na nie najbardziej wrażliwe. Ze względu na przynależność do produktów termo wrażliwych nawet najmniejsza oraz chwilowa zmiana temperatury może wpłynąć na ich właściwości oraz wartość na rynku, co będzie powodować, że dostawca poniesie ogromne straty. Tym samym koszty takiego transportu będą naprawdę wysokie. Przewoźnicy decydując się na wykonywanie danych przewozów muszą niekiedy dysponować samochodami, które posiadają dzieloną przestrzeń ładowaną będącą w stanie zapewnić dwie kompletnie różne temperatury. Spedytor jest zobowiązany udokumentować cały proces transportu, tym samym świadcząc, że wszystkie wymagania były zachowane. Ze względu na czułość produktów minimalizacja kosztów przewozu musi być bardzo dokładnie przemyślana.

Firmy zajmujące się transportem leków, w tym szczepionek, są zobowiązane do korzystania z rozwiniętych systemów, które umożliwiają monitoring oraz rejestrowanie danych dotyczących warunków występujących w ładowni. Najnowsze programy pozwalają nie tylko na monitoring oraz zbieranie informacji, ale również umożliwiają kierowcy na kontrolę panującej temperatury w ładowni z kokpitu kierowcy. Systemy te są w stanie same regulować temperaturę do potrzeb towaru oraz naprawiać usterki. O wszystkich takich działaniach jest informowany kierowca w raporcie usterek [Prochowski i Żuchowski 2016]. Dzięki stworzonemu protokołowi, osoba odbierająca towar jest w stanie otrzymać informacje dotyczące całego przebiegu procesu transportowego [Tymańska 2013]. Warunki oraz środki transportu, które są wykorzystywane w zimnym łańcuchu dostaw są uwarunkowane w podstawie prawnej oraz “Dobrej Praktyce Dystrybucyjnej”.



Rys. 2. Schemat łańcucha farmaceutycznego dla szczepionek [mp.pl/szczepienia]

5. WARUNKI TRANSPORTU I MAGAZYNOWANIA SZCZEPIONEK

Produkty lecznicze należą do produktów termowrażliwych, które wymagają odpowiednich warunków podczas ich magazynowania oraz transportowania. Dla większości leków przedział temperaturowy mieści się pomiędzy 15°C a 25°C natomiast wilgotność nie powinna przekraczać 70%. Transport medykamentów powinien odbywać się za pomocą jednego środka transportu, natomiast jeśli jest to niemożliwe jakikolwiek przeładunek produktów musi mieć miejsce w komorach przeładunkowych [Wojan, Wysocka 2011]. Transport dokonywany jest za pomocą pojazdów izotermicznych bądź pojemników izolowanych, które utrzymują stałą temperaturę dzięki wkładom chłodzącym. Nieprzestrzeganie wymagań oraz wytycznych może prowadzić do utraty efektywności danych preparatów, a nawet śmierci pacjentów bądź prowadzić do ich stałych uszczerbków na zdrowiu.

Szczepionki to preparaty termolabilne wymagające przechowywania w temperaturze 2°C-8°C, wrażliwe na działania wyższych temperatur, podobnie jak insulina, antybiotyki w postaci zawiesiny, niektóre probiotyki i krople do oczu. Stała temperatura oraz wilgotność muszą być zachowane od momentu produkcji, poprzez proces dystrybucji do magazynowania. Przy procesie ich transportowania do miejsc docelowych wykorzystywane są pojemniki izolowane, które zależnie od technologii są w stanie monitorować temperaturę w środku. Po zakupie danego preparatu wymagającego niskiej temperatury, w celu zachowania zimnego łańcucha dostaw sprzedawca jest zobowiązany przekazać odbiorcy lek w torbie termoizolacyjnej. Lekarz przed podaniem preparatu powinien upewnić się czy pacjent przechowywał szczepionkę z zachowaniem zasad „zimnego łańcucha". Jeśli nie ma pewności, że zachowano te zasady lub doszło do ich naruszenia, nie powinien podać preparatu.

Szczepionki można podzielić na dwa rodzaje: do użytku weterynaryjnego oraz do stosowania u ludzi [Damek 1990]. Przeznaczone do stosowanie w medycynie weterynaryjnej stanowią mieszaninę zawierającą substancja antygenowe, mające na celu wzbudzenie odporności przeciwko danej infekcji bądź chorobie. Farmaceutyki stosowane u ludzi są określane mianem preparatów posiadających antygeny potrafiące wywołać odporność u pacjenta przeciwko jakimkolwiek toksynom bądź infekcjom. Preparat stara się naśladować zakażenie w celu zwiększenia odporności podobnej do tej, którą pacjent by uzyskał podczas styczności z daną bakterią**.** Szczepionki mogą posiadać całe drobnoustroje, takie jak bakterie czy wirusy, które są zneutralizowane w sposób chemiczny bądź fizyczny, żywe pełnokomórkowe drobnoustroje, które są niezjadliwe oraz antygeny, które są pozyskiwane z żywych lub martwych drobnoustrojów bądź produkowane drogą syntezy chemicznej. Wyróżniamy szczepionki żywe - zawierające całe drobnoustroje, najnowszej generacji oraz inaktywowane. Szczepionki żywe charakteryzują się największą efektywnością, ale posiadają dużo efektów ubocznych, inaktywowane wymagają podania kilku dawek w celu uzyskania pełnej odporności, najnowszej generacji np. mRNA są podawane

osobom już chorym w celu umożliwienia rozpoznania danemu organizmowi komórek do wyniszczenia.

5.1. Szczepionki przeciw COVID-19

Wraz z końcem 2019 roku pojawienie się pandemii CoVid-19, choroby zakaźnej układu oddechowego wywołanej wirusem SARS-Cov 2 postawiło bardzo dużo wyzwań medycynie, przemysłowi farmaceutycznemu, a także transportowi. Do dziś najskuteczniejszym sposobem w walce z pandemią prócz stosowania maseczek, higieny rąk i dystansu społecznego pozostają szczepionki [Dz.U. 2008 poz.1570]. Około 57,8% populacji całego świata jest w pełni zaszczepione.

Zapotrzebowanie na preparat zwalczający zagrożenie zwiększało się z dnia na dzień razem z ilością zachorowań na całym świecie. Szczepionki zostały skierowane na badania kliniczne już na przełomie kwietnia/maja 2020 roku, a pierwsze dawki zostały rozporządzone już w grudniu tego samego roku. Pojawiły się pierwsze problemy związane z transportem i sposobem przechowywania preparatu.

Szczepionki na CoVid-19 stanowią jedne z najnowszych preparatów wprowadzonych na rynek [Dzieciątkowski i Filipiak 2020]. Stosowane obecnie w krajach Unii Europejskiej szczepionki przeciwko temu wirusowi możemy podzielić na dwie grupy: genetyczne oraz wektorowe. Do preparatów genetycznych zaliczamy szczepionki Pfizer, Moderna natomiast do preparatów wektorowych zaliczamy AstraZeneca i Johnson&Johnson. Szczepionki z technologią mRNA oraz AstraZeneca nie uwzględniając dawek przypominających, stanowią preparaty dwudawkowe, które należy przyjąć z odstępem 28-35 dniowym, natomiast Johnson&Johnoson wymaga podania tylko jednej dawki [Kamińska 2021].

Szczepionki genetyczne zostały zaprojektowane w sposób wykorzystujący najnowszą generację mRNA [Marruggi et al. 2019]. Nie posiadają one żadnych żywych ani martwych cząsteczek wirusa. Wszczepiony lek dostarcza organizmowi informacje oraz instrukcje, które są zawarte w cząsteczkach mRNA [Jackson et al. 2020]. Po otrzymaniu danych informacji organizm zaczyna produkować białko odpowiedzialne za pojawienie się infekcji w naszym ciele, następnie nowo wyprodukowane białko rozpoznaje jako obce i przystępuje do produkowania zwalczających przeciwciał. Szczepionki wektorowe, w przeciwieństwie do mRNA, wykorzystują fragmenty wirusów do wywołania takiej samej reakcji immunologicznej. Odmienna budowa preparatów skutkuje innymi wymaganiami dotyczącymi ich przechowywania. Wymagania temperaturowe magazynowania preparatów przeciw COVID-12 zestawiono w tab. 1.

Tabela 1

Warunki przechowywania szczepionek przeciw COCID-12

Handlowa nazwa szczepionki	Temperatura przechowywania	Okres przechowywania
Comirnaty Pfizer - BioNTech	Nieotwarta fiolka: -90 do -60°C	6 miesięcy
	Otwarta fiolka: 2-8°C	> 5 dni
Moderna	Nieotwarta fiolka: -25°C do -15°C	> 30 dni
	Otwarta fiolka: 2-25°C	> 6 godzin
AstraZeneca	Nieotwarta fiolka: 2-8°C	6 miesięcy
	Otwarta fiolka: >30°C	> 6 godzin
	Otwarta fiolka: 2-8°C	> 48 godzin
Johnson&Johnson	Nieotwarta fiolka: -25°C do -15°C	2 lata
	Nieotwarta fiolka: 2-8°C	> 3 miesiące
	Otwarta fiolka: 2-8°C	> 6 godzin
Nuvaxovid	Nieotwarta fiolka: 2-8°C	9 miesięcy
	Otwarta fiolka: 2-25°C	> 6 godzin

Każda z wymienionych grup szczepionek ma inne wymagania odnośnie transportowania oraz przechowywania. Preparat firmy Pfizer musi być transportowany w temperaturze pomiędzy -90 a -60°C, po otwarciu w temperaturze 2-8°C przez maksymalnie 5 dni. Moderna wymaga transportowania i przechowywania w temperaturze pomiędzy -25°C a -15°C, natomiast otwarta fiolka może być przechowywana, przez maksymalnie 6 godzin, w temperaturze od 2 do 25°C. Obydwie szczepionki wektorowe mają te same wymagania temperaturowe, mieszczące się między 2-8°C. Preparat firmy AstraZeneca utrzymuje swoje właściwości do sześciu miesięcy a Johnson &Johnson tylko przez trzy. Johnson &Johnson może być również przetrzymywany w bardzo niskiej temperaturze od -25°C do -15°C wydłużając jej ważność aż do 2 lat. Najnowszą szczepionką dopuszczoną do obrotu na terenie Unii Europejskiej jest Nuvaxovid, która wymaga przechowywania w zaciemnionych miejscu, również w temperaturze 2-8°C nawet do 9 miesięcy.

Preparaty Astra Zeneca, Johnson &Johnson i Nuvaxovid charakteryzują się bardzo zbliżonymi wymaganiami odnośnie przechowywania. Pomimo łatwości w ich magazynowaniu, nie są to szczepionki, które cieszyły się największą popularnością. Według statystyk, Polacy najchętniej sięgali po preparat Comirnaty firmy Pfizer i BioNTech. Szczepionka została dopuszczona do obrotu jako pierwsza na terenie całej Unii Europejskiej, już pod koniec grudnia 2020 roku. Preparat swoją popularność może zawdzięczać temu, że jako pierwszy ukazał się na rynku. Comirnaty zaj-

muje podium nie tylko w skali ilości szczepień, ale również efektywności stanowiącej 95% [Gozdek 2022]. Porównanie efektywności szczepionek przeciw CoVID -19 zestawiono w tab. 2.

Tabela 2

Efektywność szczepionek przeciw COVID – 19

Handlowa nazwa szczepionki	Skuteczność
Comirnaty Pfizer-BioNTech	95%
Moderna	94.1%
AstraZeneca	60%
Johnson&Johnson	66%
Nuvaxovid	90%

6. PODSUMOWANIE

Bezpieczny transport leków jest tematem bardzo obszernym, gdyż dotyczy całego szeregu preparatów w różnej postaci. Jakość wyrobów leczniczych może bezpośrednio wpłynąć na zdrowie pacjenta, dlatego też wszystkie procedury związane z dystrybucja muszą być ściśle przestrzegane. Podział obrotu farmaceutykami na hurtowy i detaliczny nie zwalnia przedsiębiorcy czy pośredników z zaniedbania ustalonych przepisów prawnych, szczególnie, że nie dotyczą one tylko samej operacji transportu, ale całego łańcucha dostaw.

Szczególnymi preparatami są szczepionki - postaci leku wrażliwe na jakiekolwiek zmiany warunków przechowywania. W dobie istniejącej pandemii COVID-19 temat transportu szczepionek stał się bardzo ważny ze względu na transport dużej ilości medykamentów, w krótkim czasie. Szczepionka jest lekiem pochodzenia biologicznego, co oznacza, że każdy preparat jest szczególnie wrażliwy na warunki przechowywania i transportu – głównie na zmiany temperatury. Najbardziej wrażliwe na przegrzanie są szczepionki żywe, które posiadają osłabione drobnoustroje. W momencie wystąpienia przegrzania lub zmrożenia preparatów, które nie są do tego przystosowane, tracą swoje właściwości fizykochemiczne stając się bezużytecznymi. Ze względu na kompleksową budowę szczepionek dobór odpowiedniego środka transportu oraz utrzymanie zimnego łańcucha dostaw jest kluczowe. Nawet chwilowa zmiana temperatury może mieć wpływ na życie pacjenta. Cały proces od załadunku poprzez wyładunek w aptece, hurtowni bądź dostarczenie medykamentów do pacjentów musi być prowadzony zgodnie z zasadami opisanymi w ustawie Prawo Farmaceutyczne oraz warunkami Dobrej Praktyki Dystrybucyjnej. Nie speł-

nienie wymagań stawianych magazynowaniu i transportowaniu szczepionek powoduje, że taki preparat nie nadaje się do użytku i wymaga utylizacji. Podanie szczepionki, która była nieprawidłowo przechowywana lub transportowana, może poważnie zagrozić zdrowiu, a nawet życiu osoby, której zostanie podana.

LITERATURA

Pozycje książkowe

1. Bieńczak K., Zwierzycki W. i inni, 2006, Pojazdy chłodnicze w transporcie żywności, Systherm D. Gazińska, Poznań.
2. Damek A., 1990, „Leksykon farmacji", Państwowy Zakład Wydawnictw Lekarskich, Warszawa
3. Dzieciątkowski T., Filipiak K., 2020, KoronawirusSARS-CoV-2, Zagrożenie dla współczesnego świata, Państwowy Zakład Wydawnictw Lekarskich, Warszawa
4. Kamińska E., 2021, Pandemia COVID-19. Wszystko co warto wiedzieć o koronawirusie, testach i szczepionkach, How-2.
5. Prochowski L., Żuchowski A., 2016, Technika transportu ładunkow, Wydawnictwo Komunikacji i łączności, Warszawa
6. Witkowski J., 2003, Zarządzanie łańcuchem dostaw, Wydawnictwo Naukowe PWE, Warszawa

Artykuły w czasopismach

1. Jackson NAC, Kester KE, Casimiro D, Gurunathan S, DeRosa F., 2020, The Promise of mRNA Vaccines, A Biotech and Industrial Perspective. Npj Vaccines. Nr 5, s.. 1–6.
2. Maruggi G, Zhang C, Li J, Ulmer JB, Yu D, mRNA as a Transformative Technology for Vaccine Development to Control Infectious Diseases, Molecular Therapy, nr 27, s. 757–72.
3. Piernikarski D., 2008, Agregaty chłodnicze w naczepach samochodowych, Samochodowy transport chłodniczy, Dodatek miesięcznika Chłodnictwo, klimatyzacja, Wydawnictwo Euro-media, Warszawa, str.48-52.
4. Wojan W., Wysocka A., 2011, Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego nr 644: Problemy transportu i logistyki nr 14, s.127-144.
5. Wojciechowski P., 2014, Specyfikacja zimnego łańcucha dostawna przykładzie branży farmaceutycznej, Translogistics, s. 5-13.
6. Jackson NAC, Kester KE, Casimiro D, Gurunathan S, DeRosa F. The Promise of mRNA Vaccines: A Biotech and Industrial Perspective. Npj Vaccines. 2020;5(1):1–6.

Rozporządzenia

1. Obwieszczenie Ministra Zdrowia z dnia 9 lutego 2017 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Zdrowia w sprawie wymagań Dobrej Praktyki Dystrybucyjnej (Dz.U. poz.509).
2. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 16 sierpnia 2018 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie wymagań dotyczących oznakowania opakowań produktu leczniczego i treści ulotki (Dz.U. 2018 poz. 1626).

3. Umowa o międzynarodowych przewozach szybko psujących się artykułów żywnościowych i o specjalnych środkach transportu przeznaczonych do tych przewozów (ATP), przyjęta w Genewie dnia 1 września 1970 r. (Dz. U. 2015 poz. 667).
4. Ustawa z dnia 25 sierpnia 2006 r. o bezpieczeństwie żywności i żywienia (Dz.U. 2006 poz. 1225).
5. Ustawa z dnia 6 września 2001 r. Prawo farmaceutyczne (Dz.U. 2001 Nr 126 poz. 1381).
6. Ustawa z 5 grudnia 2008 r. o zapobieganiu oraz zwalczaniu zakażeń i chorób zakaźnych u ludzi (Dz. U. 2008 Nr 234 poz. 1570).

Opracowania i raporty z badań

1. Gozdek A.,2022, Praca inżynierska - Analiza warunków transportu środków specjalnego przeznaczenia wykorzystywanych w medycynie na przykładzie szczepionek, Politechnika Poznańska

Komunikaty Internetowe

1. Kontrola temperatury w transporcie:łańcuch chłodniczy dostaw, https://www.label.pl/po/zimny-lancuch-dostaw (dostęp 09.06.2022).
2. Narodowy instytut Zdrowia Publicznego Państwowy Zakład Higieny, Wszystko o szczepieniach, https://szczepienia.pzh.gov. pl/wszystko-o-szczepieniach/ (dostęp 14.12.2021).
3. Szczepienie przeciw COVID-19: https://www.gov.pl/web/szczepimysie (dostęp 25.01.2022).
4. Wrażliwość szczepionek na czynniki fizyczne. Aktualne zalecenia World Health Organization i amerykańskich Centers for Disease Control and Prevention https://www.mp.pl/szczepienia/artykuly/wytyczne/186458,wrazliwosc-szczepionek-na-czynniki-fizyczne (dostęp 09.06.2022)

ACKNOWLEDGEMENTS

Źródło finansowania: Politechnika Poznańska, 0414/SBAD/3622, 0911/SBAD/2204

TRANSPORT OF SPECIAL PURPOSES USED IN MEDICINE ON THE EXAMPLE OF VACCINES AGAINST COVID-19

Abstract

Medicament transport concerns a whole range of preparations in various forms. The quality of medicinal products directly affects the patient's health, therefore the procedures related to the distribution of pharmaceutical preparations must be strictly followed. When selecting a means of transport for transporting drugs, including vaccines, the documentation attached to a given preparation should be followed. Each preparation requires different climatic conditions in order to maintain its properties.

The law aspects concerning the conditions of safe storage and transport of vaccines were analyzed. One of the newest preparations introduced to the market - vaccines against COVID-19, was subjected to a detailed analysis.

Keywords: vaccine, medicament form, cold supply chain.

Remigiusz JASIŃSKI*
Paula KURZAWSKA*
Kamila PRZESPOLEWSKA-GDOWIK*

ZAGROŻENIA EKOLOGICZNE W OBSZARZE LOTNISKA I ICH WPŁYW NA ZDROWIE I ŻYCIE LUDZI

Lotnisko jest jednym z obiektów infrastruktury transportu lotniczego, a zarazem jest elementem infrastruktury krytycznej. Jak każdy element infrastruktury krytycznej podlega ochronie. Jednym z rodzajów zagrożeń występujących w obrębie lotniska są zagrożenia ekologiczne. Do źródeł tego typu zagrożeń zalicza się zanieczyszczenie związkami szkodliwymi, emisję hałasu, zanieczyszczenie wód i gleb czy zaburzenie bioróżnorodności. Wpływ lotniska na otoczenie obejmuje zarówno oddziaływanie na zdrowie i życie ludzi, jak i środowisko naturalne. Celem artykułu było zaprezentowanie różnych aspektów funkcjonowania współczesnego lotniska stanowiących źródła zagrożeń ekologicznych z wyszczególnieniem ich rzutowania na jakość życia ludzi i stan środowiska.

Słowa kluczowe: lotnictwo, lotnisko, infrastruktura krytyczna, bezpieczeństwo ekologiczne

1. WPROWADZENIE

Lotnictwo jest dynamicznie rozwijająca się gałęzią transportu. Z roku na rok wzrasta liczba pasażerów korzystających ze środka transportu jakim jest samolot [ICAO 2019]. Nawet pomimo zmniejszenia ruchu lotniczego w 2019 r. na skutek pandemii koronawirusa SARS-CoV-2 obecnie obserwuje się wzrost liczby operacji lotniczych. Przewiduje się, że w roku 2024 liczba operacji lotniczych w państwach Europejskiej Konferencji Lotnictwa Cywilnego w ruchu komercyjnym może przekroczyć wartość osiągniętą w 2019 roku [EUROCONTROL 2021].

Niewątpliwie ogromną zaletą jest transportu lotniczego jest możliwość szybkiego przemieszczania się na bardzo duże odległości. Transport lotniczy przyczynia się do zwiększenia mobilność mieszkańców poszczególnych państw, jak również wpływa

* Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu, Instytut Silników Spalinowych i Napędów.

pozytywnie na gospodarkę światową. Niestety obok szeregu pozytywnych aspektów lotnictwa istnieją również negatywne skutki działalności lotniczej. Zalicza się do nich niekorzystny wpływ lotnictwa na zdrowie i życie ludzi oraz na środowisko naturalne.

Lotnisko jest elementem punktowym infrastruktury transportu lotniczego. Zgodnie z definicją jest to „wydzielony obszar na lądzie, wodzie lub innej powierzchni w całości lub w części przeznaczony do wykonywania startów, lądowań i naziemnego lub nawodnego ruchu statków powietrznych, wraz ze znajdującymi się w jego granicach obiektami i urządzeniami budowlanymi o charakterze trwałym, wpisany do rejestru lotnisk" [Ustawa Prawo lotnicze 2002]. Wpływ lotniska na otoczenie ma głównie charakter lokalny, jednakże niezaprzeczalnie niektóre aspekty jego oddziaływania są odczuwalne również w skali globalnej [Yim et al. 2015].

2. LOTNISKO JAKO ELEMENT INFRASTRUKTURY KRYTYCZNEJ

Ustawa z dnia 26 kwietnia 2007r. o zarządzaniu kryzysowym (Dz. U. Nr 89, poz. 590, z późn. zm.) definiuje *Infrastrukturę Krytyczną* jako „systemy oraz wchodzące w ich skład powiązane ze sobą funkcjonalnie obiekty, w tym obiekty budowlane, urządzenia, instalacje, usługi kluczowe dla bezpieczeństwa państwa i jego obywateli oraz służące zapewnieniu sprawnego funkcjonowania organów administracji publicznej, a także instytucji i przedsiębiorców" [Ustawa o zarządzaniu kryzysowym 2007]. Elementami infrastruktury krytycznej są systemy: zaopatrzenia w energię, surowce energetyczne i paliwa, łączności, sieci teleinformatycznych, finansowe, zaopatrzenia w żywność oraz w wodę, ochrony zdrowia, transportowe, ratownicze, zapewniające ciągłość działania administracji publicznej oraz produkcji, składowania, przechowywania i stosowania substancji chemicznych i promieniotwórczych. Systemy transportowe wskazane w ustawie obejmują między innymi transport lotniczy, do którego należy infrastruktura lotniskowa. Zatem lotnisko jest jednym z elementów infrastruktury krytycznej i zgodnie z ustawą podlega ochronie. Pod terminem *ochrona infrastruktury krytycznej* rozumie się „wszelkie działania zmierzające do zapewnienia funkcjonalności, ciągłości działań i integralności infrastruktury krytycznej w celu zapobiegania zagrożeniom, ryzykom lub słabym punktom oraz ograniczenia i neutralizacji ich skutków oraz szybkiego odtworzenia tej infrastruktury na wypadek awarii, ataków oraz innych zdarzeń zakłócających jej prawidłowe funkcjonowanie" [Ustawa o zarządzaniu kryzysowym 2007].

3. LOTNISKO JAKO ŹRÓDŁO ZAGROŻEŃ EKOLOGICZNYCH

3.1. Zanieczyszczenie związkami szkodliwymi

Do najważniejszych toksycznych składników spalin zalicza się tlenki azotu (NO_x), tlenek węgla (CO), tlenki siarki (SO_x), węglowodory (HC) i cząstki stałe (PM). Powyższe substancje stanowią do 1% całkowitej masy spalin, są jednak dużym zagrożeniem z uwagi na ich negatywny wpływ na zdrowie człowieka. Dodatkowo jako szkodliwe związki spalin uznaje się dwutlenek węgla (CO_2) i parę wodną (H_2O) z uwagi na ich wpływ na zmiany klimatyczne.

Za tlenki azotu (NO_x) będące produktem spalania paliwa uznaje się tlenek azotu (NO) oraz dwutlenek azotu (NO_2). Związki te powstają w wyniku spalania paliwa przy dużej temperaturze i ciśnieniu. Na podstawie badań epidemiologicznych oraz testów prowadzonych na ludziach i zwierzętach stwierdzono wpływ tlenków azotu na występowanie chorób układu oddechowego, nawet przy czasowo niewielkiej ekspozycji na te substancje [US EPA 2008a]. Dotychczasowe badania nie wskazują jednoznacznie, czy negatywny wpływ na układ oddechowy człowieka mają bezpośrednio tlenki azotu, czy też substancje wchodzące z nimi w reakcje chemiczne. Tlenki azotu sprzyjają powstawaniu ozonu w dolnych warstwach atmosfery. Ozon ma bardzo silne działanie utleniające, a w wyniku reakcji z jego udziałem, powstają w atmosferze tak zwane wolne rodniki, niebezpieczne dla organizmu ludzkiego ze względu na własności rakotwórcze. Ozon w dolnej warstwie atmosfery uszkadza również liście roślin. Jego silnie utleniające właściwości powodują także niszczenie materiałów, zwłaszcza gumy lub tekstyliów. Powstały ozon w dolnych warstwach atmosfery nie przyczynia się do uzupełnienia jego braku w ozonosferze. W celu rozpoczęcia procesu uzupełniania jego ilości w ozonosferze, stężenie tego związku w atmosferze musiałoby wzrosnąć o około 25%, co stanowiłoby realne zagrożenie dla życia organizmów. W kontekście emisji lotniczej zagadnienia związane z ozonem i jego wpływem na zdrowie ludzkie oceniane są na mało istotne w porównaniu z emisją cząstek stałych.

Tlenki azotu powodują zmiany klimatu. Wpływają na ocieplenie klimatu przez formowanie ozonu oraz na ochłodzenie klimatu powodując rozkład metanu. Emisja NO_x powoduje zwiększenie zdolności utleniających atmosfery, co w konsekwencji wpływa na zmniejszenie stężenia metanu. Oddziaływanie tlenków azotu na klimat jest zagadnieniem wieloaspektowym, często uzależnionym od rozpatrywanego miejsca na Ziemi oraz o charakterze sezonowym. Krótkotrwały, trwający kilka miesięcy efekt ocieplania atmosfery z uwagi na utworzony ozon jest zauważalny głównie na półkuli północnej, gdzie liczba operacji lotniczych jest znacznie większa niż na południu. Jego występowanie uzależnione jest również od izolacji słonecznej Ziemi, w związku z czym zjawisko jest sezonowe. Z kolei rozważając efekt ochładzania klimatu spowodowany zależnością między NO_x–O_3–NH_4, zauważyć można efekt

w skali globalnej, gdyż powyższa zależność ma charakter ciągły. Rozważając powyższe zjawiska o przeciwstawnym charakterze, można stwierdzić, że w skali globalnej równoważą się. Analizując jednak wpływ tlenków azotu na klimat w aspekcie regionalnym, stwierdzono ocieplenie półkuli północnej i ochłodzenie południowej [ICAO Annex 16]. W przypadku lotnictwa aż 85% tlenków azotu powstałych z powodu działalności portu lotniczego wynika ze spalania paliwa w silnikach lotniczych. Pozostałe 15% związane jest z emisją pojazdów na drogach dojazdowych, parkingach oraz obsługą naziemną [Jasiński, Pielecha i Markowski 2016, www.greenaironline.com].

Do najgroźniejszych składników spalin, ze względu na swoje mutagenne i kancerogenne właściwości, należą wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA) – w literaturze angielskiej – polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH). Głównym przedstawicielem wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych jest benzo(a)piren (BaP), który uznano przez Międzynarodową Agencję Badań nad Rakiem – IARC (International Agency for Research on Cancer) za najważniejszy czynnik kancerogenny, który w analizach środowiskowych stanowi marker całkowitej zawartości omawianych węglowodorów [Janicka i Walkowiak 2007, Kostrz i Satora 2017]. Obecność węglowodorów w spalinach silników lotniczych wynika z niezupełnego lub niecałkowitego spalania paliwa, spowodowanych lokalnym lub globalnym niedoborem tlenu.

Innym produktem spalania paliw w silnikach lotniczych jest tlenek węgla, który jest bezwonnym, niedrażniącym i silnie toksycznym gazem. W głównej mierze znany jest jako przyczyna zatruć inhalacyjnych w budynkach z niesprawną instalacją grzewczą. Silna toksyczność tlenku węgla wynika z jego dużego powinowactwa do hemoglobiny, co w konsekwencji powoduje wypieranie tlenu z krwioobiegu [Kostrz i Satora 2017]. Zawartość tlenku węgla w powietrzu powyżej 20 ppm powoduje problemy z rytmem pracy serca, bóle głowy i płytki oddech. Stężenie tlenku węgla w powietrzu większe niż 200 ppm skutkuje zmniejszeniem ostrości widzenia i omdleniami u dzieci, natomiast większe wartości stężenia są przyczyną śpiączki, drgawek i śmierci. Podobnie jak w przypadku węglowodorów, obecność CO w spalinach jest wynikiem niezupełnego lub niecałkowitego spalania paliwa w silniku.

Spalanie paliw kopalnych zawierających w swoim składzie siarkę, skutkuje powstawaniem dwutlenku siarki, trójtlenku siarki oraz gazowej fazy kwasu siarkowego, które określane są jako tlenki siarki (SO_x). Emisja SO_x może skutkować formowaniem cząstek stałych wtórnych. Badania wskazują na związek między zarówno krótkotrwałą i długotrwałą ekspozycją na tlenki siarki a zachorowalnością na choroby układu oddechowego i przedwczesną umieralnością [US EPA 2008b]. Nie określono czy negatywne efekty zdrowotne związane są bezpośrednio z indywidualnym występowaniem tlenków siarki w atmosferze czy są też powodowane przez mieszaniny substancji w skład których wchodzą SO_x.

Dwutlenek węgla pochodzenia lotniczego wypływa tak samo na klimat jak CO_2 z każdego innego źródła, przyczyniając się jego do ocieplania. Opisywany gaz cieplarniany charakteryzuje się bardzo długim czasem utrzymywania w atmosferze (nawet

kilkaset lat). Przeciwdziała wydostawaniu się promieniowania podczerwonego z planety, pochłaniając je i oddając do atmosfery, w wyniku czego następuje zwiększenie temperatury jej powierzchni. Emisję dwutlenku węgla należy bezpośrednio utożsamiać ze zużyciem paliwa (FC – fuel consumption), gdyż jest naturalnym produktem reakcji spalania. Transport lotniczy z uwagi na swój dynamiczny rozwój zwiększa swoje zapotrzebowanie na paliwo, w związku z czym statki powietrzne emitują coraz więcej dwutlenku węgla, głównie na obszarach najczęściej uczęszczanych dróg lotniczych. Należy jednak zauważyć, że ze względu na wprowadzanie nowych technologii w aspekcie aerodynamiki płatowca oraz budowy silników odrzutowych, średnie zużycie paliwa statków powietrznych zmniejszyło się w ciągu ostatnich 20 lat o około 30% [Aviation 1992-2015].

Inny gazem cieplarniany jest para wodna, która uznawana jest za najsilniejszy gaz cieplarniany. Na każde 100 cząsteczek gazów cieplarnianych w atmosferze, 90 to cząsteczki pary wodnej. Skupia się blisko powierzchni Ziemi, tymczasem pozostałe gazy cieplarniane zalegają w wyższych warstwach atmosfery. Odpowiada ona jednak za największe dodatnie sprzężenie w systemie klimatycznym. Wzrost temperatury wzmaga parowanie wody, co prowadzi do pogłębiania efektu cieplarnianego, który ponownie powoduje zwiększenie parowania. Z uwagi na powyższe sprzężenie klimat jest bardzo wrażliwy na ocieplenie spowodowane emisją pary wodnej pochodzenia antropogenicznego. Zjawiskami towarzyszącymi emisji pary wodnej z silników lotniczych jest powstawanie smug kondensacyjnych oraz chmur pierzastych, których utrzymywanie powoduje ocieplenie klimatu. Powyższy efekt uzależniony jest głównie od emisji pary wodnej oraz warunków otoczenia (ciśnienie, temperatura i wilgotność). Smugi kondensacyjne utrzymują się przez kilka godzin, natomiast chmury pierzaste od kilku godzin do kilku dni. Ze względu na krótki i okresowo-miejscowy charakter zjawiska, jego wpływ na klimat jest lokalny [Macintosh i Wallace 2009].

3.2. Zanieczyszczenie cząstkami stałymi

Jedną z podstawowych kwestii przy ocenie jakości powietrza jest stężenie cząstek stałych. Cząstki stałe to termin ogólnie używany na typ zanieczyszczeń powietrza, składający się z kompleksu różnych mieszanin cząstek zawieszonych, które różnią się wielkością, składem i miejscem tworzenia. Można je zdefiniować jako aglomeraty sadzy z zaadsorbowanymi substancjami frakcji nierozpuszczalnej SOL (insoluble fraction) i frakcji rozpuszczalnej SOF (soluble organic fraction). W skład nierozpuszczalnej frakcji wchodzą: węgiel stały (w formie zbliżonej do grafitu), rozpuszczalne w wodzie siarczany, azotany, metale, woda związana z siarczanami oraz pozostałe cząstki zawierające węgiel RPM (residual particulate mass). Frakcja organiczna to część materii cząstek stałych, która jest poddawana ekstrakcji dwuchlorometanem [Merkisz i Pielecha 2014]. Do głównych źródeł tworzenia tego rodzaju zanieczyszczenia zalicza

się: fabryki, elektrownie, spalarnie, silniki spalinowe i wiele innych. Podstawowy podział cząstek stałych wynika z ich średnicy aerodynamicznej, który pozwolił na wyznaczenie dwóch głównych grup: PM2,5 i PM10 (particulate matter) dla średnicy mniejszej niż odpowiednio 2,5 μm i 10 μm. Dynamiczny rozwój badawczy zagadnienia cząstek stałych oraz zmiany ich właściwości w zależności od wielkości wymusiły wprowadzenie bardziej szczegółowego podziału. Przyjęto, że cząstki drobne (fine particles lub nanocząstki) to cząstki mniejsze niż 1 μm (PM1), natomiast cząstki najdrobniejsze (ultrafine particles) to cząstki o średnicy poniżej 0,1 μm (PM0,1) [Kampa i Castanas 2008, Merkisz i Pielecha 2014].

Cząstki stałe charakteryzujące się najmniejszymi rozmiarami (1–80 nm) to cząstki powstałe według mechanizmu nukleacji. Polega on na powstawaniu cząstek podczas rozcieńczania i ochładzania spalin (po wejściu do otoczenia). Powstałe cząstki charakteryzują się bardzo małą masą, a złożone są z lotnych frakcji rozpuszczalnej, niewielkiej ilości węgla i związków metali. Cząstki stałe powstałe w wyniku omawianego procesu dominują w spalinach silników odrzutowych [Merkisz i Pielecha 2014, Markowski, Pielecha i Jasiński 2017]. Cząstki stałe mające największy udział w emitowanej masie powstają według mechanizmu akumulacyjnego (agregacja) i obejmują cząstki o średnicy 80–1000 nm. Są to aglomeraty sadzy z zaadsorbowanymi substancjami frakcji rozpuszczalnej. Dodatkowo wyróżnić można cząstki stałe powstające według mechanizmu zgrubnego. Są to cząstki o średnicy 2,5–40 μm, które osiadły na ściankach układu wylotowego, a następnie zostały zerwane przez przepływające spaliny [Merkisz i Pielecha 2014, Jasiński i Pielecha 2017].

Zanieczyszczenie atmosfery cząstkami stałymi emitowanymi przez silniki lotnicze wpływać negatywnie na zdrowie człowieka. Cząstki stałe o średnicy mniejszej niż 1 μm mogą być przyczyną różnych chorób, przede wszystkim serca i płuc, i związanych z tym zgonów. Nasilanie się chorób jest łączone z długoterminowym oddziaływaniem cząstek znajdujących się w otoczeniu. Przyczyniają się one do występowania takich chorób jak astma i zapalenie oskrzeli. Są też jedną z przyczyn arytmii serca i ataków serca. Najpoważniejsze problemy wynikają z oddziaływania cząstek drobnych. Najmniejszą odporność na negatywne oddziaływanie cząstek stałych wykazują ludzie z chorobami serca i płuc, osoby starsze oraz dzieci [Pielecha 2012].

Przyjmuje się, że w przypadku emisji z silników lotniczych dominują cząstki stałe o średnicach nie większych niż 2,5 μm i można je podzielić na cząstki pierwotne oraz wtórne. Cząstki stałe pierwotne złożone są z nielotnej frakcji węgla (głównie sadzy) i innych składników spalin, które gromadzą się na rdzeniu węglowym wykorzystując go jako jądro kondensacji. W skład cząstek pierwotnych wchodzą kwas azotowy i siarkowy, woda oraz ciężkie węglowodory zawierające do 30 atomów węgla. Średnice omawianych cząstek osiągają wartości kilkudziesięciu nanometrów. Cząstki stałe wtórne powstają w wyniku reakcji cząstek stałych pierwotnych i innych toksycznych składników spalin, takich jak tlenki azotu, tlenki siarki i lekkie węglowodory. Produktami reakcji zachodzących na cząstkach stałych, które można odnaleźć w składzie cząstek wtórnych to: siarczan amonu, azotan amonu oraz inne związki, głównie węglowodory. Powstałe wtórne cząstki stałe utrzymują się w powietrzu od kilku godzin do

kilku dni, wpływając na stężenie pyłów na obszarach przyległych do lotnisk. Badania opublikowane w publikacji [Brunelle-Yeung 2009] wskazują, że 70% cząstek stałych emitowanych przez silniki lotnicze związane jest z emisją tlenków azotu, 14% stanowią cząstki stałe pierwotne, 12% cząstek stałych związanych jest z tlenkami siarki, a 4% formuje się z udziałem węglowodorów.

Ekspozycja na działanie cząstek stałych skutkuje zwiększeniem ryzyka zachorowalności na choroby układu krążenia oraz oddechowego i powoduje przedwczesną umieralność. W przypadku przedwczesnych zgonów, dominującą rolę mają cząstki stałe wtórne, głównie wytworzone na bazie prekursorów azotowych i siarkowych [Brunelle-Yeung 2009]. Drugorzędną rolę pełnią w tej kwestii cząstki stałe pierwotne oraz te związane z emisją węglowodorów. Autorzy wielu publikacji [Watkiss, Pye i Holland 2005, Rojo 2007, Brunelle-Yeung 2009] wskazują, iż emisja cząstek stałych ma dominujące znacznie w kwestii negatywnych efektów zdrowotnych i znacznie przewyższa w tej kwestii emisję pozostałych toksycznych składników spalin.

3.3 Emisja hałasu

Hałas można zdefiniować jako nieprzyjemny, dokuczliwy, niepożądany dźwięk, który wpływa negatywnie na organizm człowieka, a także oddziałuje na zwierzęta. Przede wszystkim odczuwalny jest w skali lokalnej [Śliwińska 2018]. Według Światowej Organizacji Zdrowia (WHO - World Health Organization) hałas komunikacyjny, do którego zaliczają się w głównej mierze hałas drogowy, kolejowy i lotniczy, jest drugim najważniejszym czynnikiem prowadzącym do złego stanu zdrowia w mieszkańców Zachodniej Europy [WHO i JRC 2011]. W tab. 1 zaprezentowano liczbę w Polsce osób narażonych na wysokie poziomy hałasu przekraczające progi sprawozdawczości Unii Europejskiej dla różnych źródeł hałasu w środowisku, takich jak drogi, kolej, lotnictwo i przemysł.

Z przedstawionych danych wynika, że lotnictwo jest trzecim miejscu pod względem liczby osób narażonych na hałas w analizowanym zestawieniu. Zdecydowanie dominującym źródłem narażenia jest hałas drogowy, co jest dość oczywiste ze względu na rozwiniętą infrastrukturę drogą. Hałas pochodzenia lotniczego oddziałuje na mniejszą liczbę osób, gdyż jest związany przede wszystkim z działalnością portów lotniczych, należących di infrastruktury punktowej.

Hałas lotniczy jest jednym z najbardziej uciążliwych skutków funkcjonowania lotnictwa. Większość skarg, które zgłaszali mieszkańcy terenów sąsiadujących z lotniskami, wynikały z dokuczliwego oddziaływania hałasu. Lotnisko jako całość może generować hałas na różne sposoby [Jasiński et al. 2016]. Okazuje się jednak, że najbardziej szkodliwym jest hałas powstający podczas pracy silników lotniczych [ICAO Annex 16].

Tabela 1

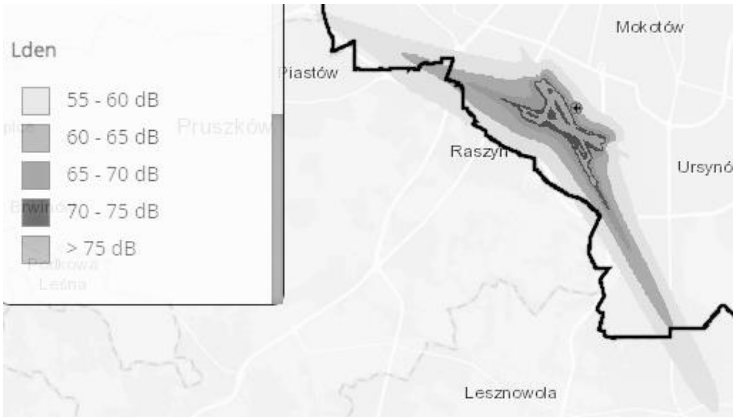
Liczba w Polsce osób narażonych na wysokie poziomy hałasu przekraczające progi sprawozdawczości Unii Europejskiej dla różnych źródeł hałasu w środowisku (L_{den} – poziom dzienno-wieczorno-nocny dźwięku – równoważny poziom dźwięku określany dla wszystkich dób w roku; L_{night} – poziom nocny równoważny poziom dźwięku określany dla wszystkich nocy w roku). Źródło: opracowanie własne na podstawie [www.eea.europa.eu]

	$L_{den} \geq 55$ dB			$L_{night} \geq 50$ dB		
	2007	2012	2017	2007	2012	2017
Hałas drogowy	3 855 000	5 851 900	4 406 500	2 850 000	4 008 100	2 770 200
Hałas kolejowy	665 000	405 400	227 300	338 000	314 000	141 200
Hałas lotniczy	57 200	61 100	52 100	5 300	4 200	5 900
Hałas przemysłowy	42 100	48 300	19 200	33 900	15 000	7 500

Do głównych źródeł hałasu w samolotach odrzutowych zalicza się:

- strumień gazów na wylocie z silnika,
- strumień powietrza na wlocie do silnika,
- drgania mechaniczne poszczególnych elementów wchodzących w skład budowy statku powietrznego, takich jak np. skrzydła, kadłub, stateczniki, elementy mechanizacji skrzydeł,
- praca elementów konstrukcyjnych silnika (np. wentylator, turbina) oraz urządzeń pomocniczych, a także hałas generowany w trakcie procesu spalania paliwa w silniku.

Samolot podczas startu może generować hałas na poziomie nawet 120 dB, przy czym o granicy bólu mówi się już w przypadku wartości 130 dB [Kamiński et al. 2016]. Na rys. 1 pokazano mapę ilustrującą narażenie na hałas pochodzący z Lotniska im. Chopina w Warszawie w ciągu przeciętnego okresu dziennego.



Rys. 1. Mapa ilustrująca narażenie na hałas pochodzący z Lotniska im. Chopina w Warszawie w ciągu przeciętnego okresu dziennego. Źródło: www.eea.maps.arcgis.com

Można zauważyć, że obszar, w którym hałas przekracza wartość 75 dB, obejmuje przede wszystkim drogi startowe i drogi kołowania. Należy jednak pamiętać, że jest to poziom uśredniony, a hałas generowany przez statki powietrzne ma charakter zmienny. Oznacza to, że co prawda taki hałas nie trwa permanentnie, jednakże pojawia się okresowo i może wzrastać dość gwałtownie osiągając znaczne wartości. Warto również zauważyć, że obszar obejmujący hałas o wartości 55-60 dB rozciąga się wzdłuż torów przylotów i odlotów samolotów od około 6 km za zachód do około 8 km na południowy wschód od lotniska.

Udowodnionym jest, że hałas wpływa niekorzystne na zdrowie osób zamieszkujących obszary wokół lotnisk. Można to rozpatrywać w dwóch aspektach: jako słuchowe konsekwencje zdrowotne oraz skutki również związane ze zdrowiem, ale nie obejmujące narządu słuchu. W przypadku konsekwencji słuchowych wymienia się postępującą w czasie utratę słuchu oraz uszkodzenie ucha wewnętrznego. Skutki inne niż słuchowe obejmują dolegliwości sercowo-naczyniowe, w tym nadciśnienie czy choroba wieńcowa, zaburzenia snu, pogorszenie aktywności intelektualnej, silne irytacje, zaburzenia nerwowe. Uważa się, że w Europie każdego roku długoterminowe oddziaływanie hałasu środowiskowego przyczynia się 12 000 przedwczesnych zgonów oraz do powstawania 48 000 nowych przypadków choroby niedokrwiennej serca. Ponadto, według szacunków, 22 mln osób odczuwa ciągłą wysoką dokuczliwość hałasu, a 6,5 mln osób cierpli na długotrwałe wysokie zaburzenia snu. W przypadku hałasu lotniczego przewiduję się, że przyczynia się on do problemów z nauką doświadczanych przez 12500 dzieci w wieku szkolnym [WHO 2018, Majka i Wacnik 2020].

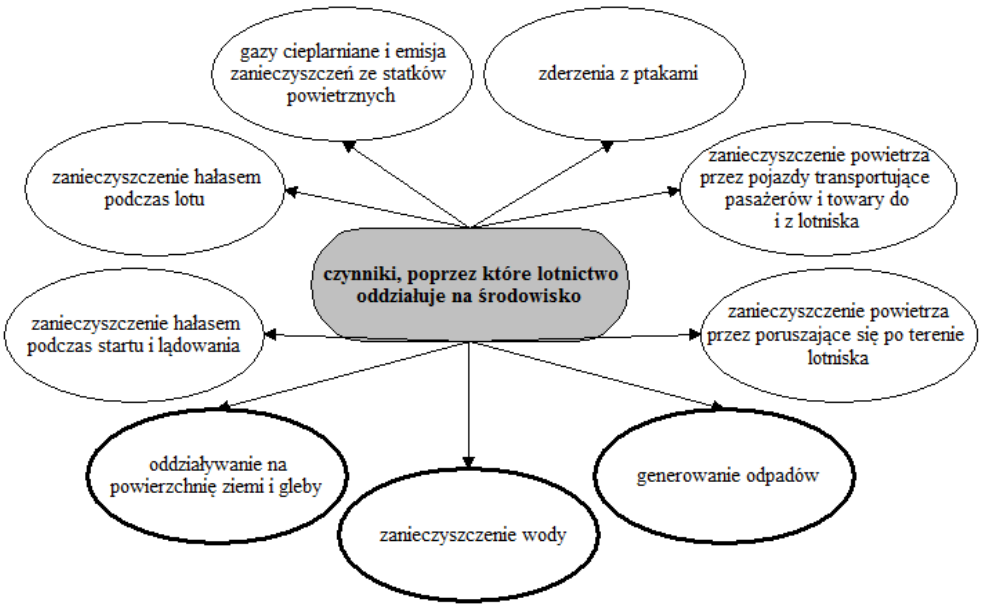
Problem emisji hałasu, której źródłem jest działalność lotnicza, potęguje dodatkowo rosnący ruch lotniczy oraz zwiększająca się liczba mieszkańców terenów okołolotniskowych.

3.4. Zanieczyszczenie wód i gleb

Woda jest jednym z podstawowych i niezbędnych dóbr do prawidłowego funkcjonowania człowieka. Dostęp wody pitnej jest istotnym czynnikiem wpływającym na jakość życia. Ponadto woda jest naturalnym środowiskiem dla wielu gatunków zwierząt oraz roślin.

Aby ludzie mogli się cieszyć zdrowiem i dobrym samopoczuciem, koniecznym jest zapewnienie im dostępu do dobrej jakości wody pitnej oraz wody do celów sanitarnych. W Europie kwestia dostępu do czystej wody nie stanowi bardzo dużego problemu, jednakże wciąż zdarzają się przypadki, że w niektórych lokalizacjach jakość wody pozostawia wiele do życzenia. Zanieczyszczenie wody oddziałuje nie tylko na zdrowie i życie ludzi, ale również na florę i faunę, przyczyniając się do wymierania bardziej wrażliwych gatunków oraz zmian w ekosystemie.

Zanieczyszczenie wody, wraz zanieczyszczeniem gleb i generowaniem odpadów, jest jednym z aspektów zróżnicowanego wpływu lotnictwa na środowisko (Rys. 2).



Rys. 2. Przykładowe czynniki, poprzez które lotnictwo oddziałuje na środowisko. Źródło: opracowanie własne na podstawie [EEA 2017, www.cpk.pl]

Do rosnącego zapotrzebowania na wodę w pewnością przyczynia się rozwój lotnisk i infrastruktury lotniskowej. W przypadku portów lotniczych niezbędna jest właściwa polityka zarządzania ściekami oraz ich oczyszczania. Jednakże dochodzi tutaj

dodatkowy aspekt, a mianowicie zanieczyszczenie spowodowane stosowaniem środków odladzających. Wykorzystanie środków do odladzania jest często koniecznością w porze zimowej i służy oczyszczaniu statków powierzanych oraz infrastruktury lotniska ze śniegu, lodu i szronu. Środki te, po ich użytkowaniu, spływają na powierzchnię ziemi i mogą przenikać do wód powierzchniowych lub poziemnych. Substancje stosowane do odladzania na terenach portów lotniczych są tworzone na bazie preparatów zawierających glikol etylenowy lub propylenowy. Ponadto w ich składzie znajdują się również dodatki zawierające inhibitory korozji metali, inhibitory rdzy czy środki powierzchniowo czynne, wykazujące właściwości toksyczne, a także mocznik [US EPA 2012]. W trakcie procesu rozkładu mocznika, który przedostał się już do wód powierzchniowych, dochodzi do zużywania znacznych ilości tlenu. Może mieć to poważne konsekwencję dla organizmów podwodnych wykazujących zapotrzebowanie na tlen.

Czynniki odpowiadające za zanieczyszczenie wód nieuchronnie prowadzą również do zanieczyszczenia gleby i vice versa. Co więcej do zanieczyszczenie gleb przyczyniają się również związki toksyczne zawarte w powietrzu, gdyż może dochodzić do ich osadzania się na ziemi [EEA 2019].

Innym problemem jest zajmowanie pod budowę portów lotniczych żyznych gruntów rolnych i doprowadzanie tym samym do ich degradacji. Powierzchnie pokryte betonem czy asfaltem powodują uszczelnianie gleby. W konsekwencji zaburza to udział gleb w procesach takich jak gromadzenie wody, regulacja klimatu, oczyszczanie wód ze związków toksycznych czy zapewnianie środowiska życia [EEA 2019]. Ponadto zajmowanie gruntów rolnych może powodować zmniejszenie produkcji rolnej, a tym samym wpływać ujemnie na bezpieczeństwo żywnościowe.

Transport lotniczy jest źródłem znacznej ilości odpadów. W przypadku portów lotniczych odpady można podzielić na:

- komunalne odpady stałe,
- gruz budowlany i rozbiórkowy,
- odpady z samolotów,
- odpady biodegradowalne,
- odpady niebezpieczne i przemysłowe,
- odpady z toalet [ICAO Waste Management at Airports].

W skład stałych odpadów komunalnych wchodzą przedmioty codziennego użytku, do których zaliczyć można opakowania szklane, plastikowe, aluminiowe, materiały papierowe i tekturowe. Można je podzielić we względu na źródło na odpady z terminala portu lotniczego, odpady osób/przedsiębiorstw wynajmujących obszary portu, odpady generowane przez przewoźników lotniczych czy odpady z operacji cargo. Z kolei odpady budowlane i rozbiórkowe powstają na skutek prac budowalnych na terenach lotniska i obejmują m.in. beton, drewno, cegły, skały, żwir, tworzywa sztuczne.

Odpady z samolotów są osobną kategorią obejmującą specyficzny typ odpadów komunalnych stałych, wytwarzanych na podkładach pasażerskich statków powietrznych. Na odpady biodegradowalne składają się odpady żywnościowe z terminali czy

odpady z usuwanej roślinności. Natomiast do odpadów niebezpiecznych i przemysłowych zalicza się oleje, rozpuszczalniki oraz wszelkie inne odpady chemiczne generowane podczas czyszczenia oraz konserwacji samolotów i pojazdów naziemnych, tankowania paliwa czy odladzania samolotów i nawierzchni lotniska. Odpady należące do tej kategorii wymagają szczególnego postępowania z nimi, podobnie jak odpady toaletowe, które w sowim składzie mogą zawierać szkodliwe związki chemiczne oraz niebezpieczne bakterie i drobnoustroje. a w przypadku niewłaściwego postępowania z nimi mogą stanowić zagrożenie dla środowiska i zdrowia ludzi. Należy zachować ostrożność, aby nie dopuścić do uwolnienia odpadów z sanitariatów6.

Niewłaściwa gospodarka odpadami z terenów lotnisk prowadzi do zanieczyszczenia środowiska, a tym samym wpływa negatywnie na jakość życia ludzi. W przypadku odpadów niebezpiecznych istnieje ryzyko, że będą one stanowiły zagrożenie dla środowiska, a także zdrowia i życia okolicznych mieszkańców.

3.5 Wpływ na bioróżnorodność

Lotnisko i jego działalność ma również wpływ na bioróżnorodność, w szczególności na siedliska zwierząt i ich bytowanie w okolicach lotnisk. Głównymi czynnikami wpływającymi negatywnie na zwierzęta w okolicach lotnisk są bezpośrednie zderzenia ptaków ze statkami powietrznymi, a także hałas i jego wpływ na zmiany zachowania ptaków i zwierząt. Ze względu na budowę lotnisk i rozrastanie się obszarów okołolotniskowych dochodzi do utraty siedlisk żyjących tam zwierząt lub do ich fragmentacji. Fragmentacja siedlisk ma miejsce, gdy obszar siedliska zostanie podzielony na mniejsze obszary, np. przez ogrodzenie lub drogę. Obszar lotniska jest atrakcyjnym miejscem dla bytowania ptaków, m.in. ze względu na częste koszenie traw, dzięki czemu niektórym gatunkom ptaków łatwiej jest zdobyć pożywienie (drobne ssaki, owady). Dlatego też na obszarze lotnisk często żerują drobne ptaki wróblowe *Passeriformes*, szponiaste *Accipitriformes*, krukowante *Corvidae* lub niektóre gatunki mew [Skakuj, Kitowski i Łukasik 2014]. Na obecność ptaków w obszarze lotnisk wpływa także położenie lotnisk w pobliżu lasów, ogródków działkowych lub zbiorników wodnych, które są terenami o zróżnicowanych i bogatych siedliskach [Skakuj, Kitowski i Łukasik 2014].

Dużym problemem związanym z występowaniem ptaków na obszarze lotniska i w jego okolicy są zderzenia statków powietrznych z ptakami, które prawie zawsze kończą się śmiercią zwierząt. Zdecydowana większość zderzeń statków powietrznych z ptakami ma miejsce poniżej 1000 m, podczas fazy startu, początkowego wznoszenia, zniżania oraz lądowania [Metz et al. 2021]. Najczęściej w kolizjach ze statkami powietrznymi uczestniczą ptaki, które są bardzo liczne i najwięcej czasu spędzają w powietrzu, są to np. jerzyk i dymówka [Skakuj i Grabowska].

W Polsce do gatunków powodujących największe ryzyko kolizji ze statkiem powietrznym zalicza się:

− bocian biały: masa od 2 do 4 kg, w Polsce gniazduje nawet do 50 000 par. W Polsce północno-wschodniej oraz wschodniej zagęszczenie bocianów przekracza 40 par na 100 km^2. Duże stada bocianów migrują nad Polską na wysokości czasem znacznie ponad 1000 m n.p.m.,

− mewy: masa od 0,3 do 1,5 kg w zależności od rodzaju. Najczęściej występują w rejonie wybrzeża, jednak do zderzeń ze statkami powietrznymi dochodzi także w głębi kraju, ze względu na znaczny wzrost liczebności mew na terenie Polski oraz rozszerzanie areału lęgowego,

− gęsi: masa od 2 do 4 kg, w okresach migracji tworzą skupiska nawet ponad 100 000 ptaków i migrują w dużych stadach w dzień i w nocy na wysokościach nawet powyżej 3000 m n.p.m.,

− bielik: masa od 3 do 6 kg, występuje głównie w Polsce północnej i zachodniej i jest jednym z największych i najcięższych ptaków szponiastych Europy,

− myszołów: masa około 1 kg, jest regularnie spotykany na lotniskach w całej Polsce, podczas migracji mogą tworzyć większe zgrupowania nawet do 100 osobników,

− żuraw: masa od 5 do 7 kg, jego populacja w Polsce znacznie wzrosła w ciągu ostatnich lat, często spotykany w północnej oraz zachodniej Polsce w okresie migracji jesiennej,

− pustułka: masa około 0,2 kg, występuje na terenie całej Polski. Jest to najczęściej spotykany ptak szponiasty na lotniskach. Często wykorzystuje do polowania na gryzonie np. oznakowanie pionowe lub też oświetlenie lotniskowe, jako czatownice. Mogą zakładać gniazda na budynkach na terenie lotnisk,

− szpak: masa około 0,1 kg. Występuje na terenie Polski przez cały rok. W okresie jesiennym skupiają się w bardzo duże stada liczące nawet po 10 000 osobników,

− gołębie miejskie lub hodowlane: masa około 0,3 kg, często hodowle są zlokalizowane w bezpośrednim sąsiedztwie lotnisk, co jest poważnym zagrożeniem dla ruchu lotniczego [Skakuj i Grabowska].

Aby ograniczyć liczbę kolizji statków powietrznych z ptakami konieczne jest zmniejszenie atrakcyjności lotnisk dla ptaków oraz ograniczenie możliwości żerowania. Ptaki bytujące na obszarze lotnisk i w ich okolicach są zniechęcane do bytowania na obszarze lotniska poprzez np. rzadsze koszenie traw lub zmniejszenie obszaru koszenia traw, odpowiednie zabezpieczenie zbiorników wodnych i likwidacja zastoisk wody. Oprócz zmniejszania atrakcyjności obszarów lotniska pod względem żerowania i odpoczynku w obszarze lotnisk, ważne jest także odstraszanie ptaków z okolic lotniska. Do odstraszania ptaków często wykorzystuje się inne zwierzęta, np., psy rasy Border Collie lub sokoły, a także race hukowe. Metoda sokolnicza pozwala odstraszyć mniejsze ptaki z obszaru lotniska, ponieważ ptaki na widok sokoła uciekają, chcąc uniknąć konfrontacji i nie powracają w te same miejsca, ponieważ uznają je za teren łowiecki sokoła [Skakuj i Grabowska]. W ostatnich latach wykorzystuje się także radary informujące o obecności ptaków w obszarze lotniska. Radary są w stanie zlokalizować i śledzić ruchy ptaków, a zdobyte informacje są dostarczane odpowiednim jednostkom zajmującym się zderzeniami z ptakami, dzięki

czemu możliwe jest zidentyfikowanie miejsca aktywności ptaków i uniknięcie kolizji ze statkiem powietrznym [Metz et al. 2021]. Radary monitorujące obecność ptaków są stosowane np. w Porcie Lotniczym Amsterdam Schiphol, Berlin Brandenburg oraz w Porcie Lotniczym King Shaka w Durbanie [Metz et al. 2021, www.robinradar.com].

Kolejnym negatywnym czynnikiem oddziałującym na zwierzęta w okolicach lotnisk jest hałas. Hałas emitowany przez startujące i lądujące statki powietrze wpływa na sposób zachowania się zwierząt bytujących na obszarach lotnisk. Wysokie natężenie hałasu podczas startu statków powietrznych może powodować opuszczanie lęgów przez ptaki i mniejszy sukces lęgowy, co w rezultacie wpływa na procesy reprodukcyjne i stan populacji ptaków. Niektóre ptaki przyzwyczajają się do hałasu w obrębie lotnisk i po pewnym czasie start lub lądowanie samolotu nie powoduje ich płoszenia [Skakuj, Kitowski i Łukasik 2014].

4. PODSUMOWANIE

Podsumowując transport lotniczy jest nieodzowną częścią współczesnego świata. Jego dynamiczny rozwój niesie za sobą wiele korzyści, ale i niekorzystnych skutków. Do takich zaliczają się zagrożenia ekologiczne. Szczególną częścią infrastruktury lotniczej są lotniska, jako że stanowią istotny element infrastruktury krytycznej.

Lotniska oddziałują na otoczenie poprzez emisję następujących zanieczyszczeń: tlenków azotu, tlenku węgla, tlenków siarki, węglowodorów i cząstek stałych. Każdy z wymienionych związków oraz cząstki stałe mogą w określonych warunkach zagrażać zdrowiu i życiu ludzi. Ponadto związki takie jak dwutlenek węgla czy para wodna przyczyniają się do zmian klimatu. Podobnie nadmierna ekspozycja na hałas okołolotniskowy prowadzi do powstawania wielu różnych chorób, niekoniecznie powiązanych z narządem słuchu.

Innym rodzajem źródeł zagrożeń ekologicznych są zanieczyszczenie wód i gleby oraz generowanie odpadów. Przedostawanie się do wód i gruntów niebezpiecznych substancji z obszarów lotnisk pogarsza jakość życia mieszkańców terenów sąsiadujących z lotniskami oraz wpływa niekorzystnie na florę i faunę. Analogicznie niekorzystna w skutkach może się okazać niewłaściwa gospodarka odpadami powstającymi w obrębie portów lotniczych.

Istotną negatywną konsekwencją działalności lotnisk jest także ich wpływ na bioróżnorodność, w szczególności na siedliska zwierząt i ich bytowanie w okolicach lotnisk. Przykładowo zderzenia z ptakami prowadzą do zmniejszenia liczby osobników poszczególnych gatunków.

Świadomość zagrożeń ekologicznych mogących zaistnieć w wyniku funkcjonowania lotnisk umożliwia podejmowanie optymalnych działań zmierzających do zmniejszenia wynikającego z nich ryzyka. Jest to istotne z punktu widzenia bezpieczeństwa infrastruktury krytycznej.

LITERATURA

Pozycje książkowe

1. Brunelle-Yeung E., The impacts of aviation emissions on human health through changes in air quality and UV irradiance. Masters of Science thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge 2009.
2. Merkisz J., Pielecha J., Emisja cząstek stałych ze źródeł motoryzacyjnych. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2014.
3. Pielecha J., Identyfikacja parametrów cząstek stałych z silników spalinowych. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2012.
4. Rojo J., Future trends in local air quality impacts of aviation. S.M. thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge 2007.

Artykuły w czasopismach

1. Janicka A., Walkowiak W., Emisja lotnych związków organicznych i wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych z silnika zasilanego biopaliwem. V Combustion Engines, 2007, 46.
2. Jasiński R., Pielecha J., Evaluation of the impact of oil presence in the aviation fuel on particle size distribution. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria Transport, 2017, 94.
3. Jasiński R., Pielecha J., Markowski J., Benedict P., 2016, Zewnętrzne koszty środowiskowe działalności transportu lotniczego, Autobusy, nr 12, s. 211-215.
4. Kamiński M., Pospolita W., Cholewiński M., Łagocka A., 2016, Emisja zanieczyszczeń z sektora transportu lotniczego i jej wpływ na zdrowie człowieka, Kosmos, tom 65, nr 4, 487-493.
5. Kampa M., Castanas E., Human health effects of air pollution. Environmental Pollution, 2008, 151.
6. Kostrz M., Satora P., 2017, The compounds responsible for air pollution, Ecological Engineering, nr 18, s. 89-95.
7. Macintosh A., Wallace L., International aviation emissions to 2025: Can emissions be stabilized without restricting demand? Energy Policy, 2009, 37.
8. Majka A., Wacnik P., 2020, Współpraca ponadeuropejska w obszarze lotnictwa w świetle realizacji celów agendy Flightpath 2050, Mechanika w Lotnictwie ML-XIX 2020, s. 175-186.
9. Markowski J., Pielecha J., Jasiński R., Model to assess the exhaust emissions from the engine of a small aircraft during flight. Procedia Engineering, 2017, 192.
10. Metz, I.C.; Ellerbroek, J.; Mühlhausen, T.; Kügler, D.; Hoekstra, J.M.,2021, Analysis of Risk-Based Operational Bird Strike Prevention. Aerospace 2021, 8, 32.
11. Śliwińska A., 2018, Sposoby ograniczenia hałasu emitowanego do środowiska przez trans-port lotniczy, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, nr 9, s. 89-95.
12. Skakuj M., Kitowski I., Łukasik D., 2014, Wpływ ruchu lotniczego na ptaki. Część I, Ornis Polonica 2014, 55: 48-68.
13. Yim S.H.L., Lee G.L., Lee I.H., Allroggen F., Ashok A., Caiazzo F., Eastham S.D., Malina R., Barrett S.R.H., 2015, Global, regional and local health impacts of civil aviation emis-sions, Environmental Research Letters 2015, 10, 3:1-3:12.

14. Watkiss P., Pye S., Holland M., Baseline scenarios for service-contract for carrying out cost-benefits analysis of air quality related issues, in particular in the clean air for Europe (CAFE) program. AEA Technology Environment, 2005.

Artykuły w materiałach konferencyjnych

1. Jasiński R., Pielecha J., Markowski J., 2016, Emission of particulate matter during aircraft landing operation. E3S Web of Conferences, 2016, 10.

Rozporządzenia

1. International Civil Aviation Organization, Annex 16: Environmental protection, vol. I: Aircraft noise, 4th ed. ICAO.
2. Ustawa z dnia 3 lipca 2002 r. Prawo lotnicze (Dz.U. 2002 nr 130 poz. 1112).
3. Ustawa z dnia 26 kwietnia 2007 r. o zarządzaniu kryzysowym (Dz. U. 2007 Nr 89, poz. 590).

Komunikaty Internetowe

1. Aviation 1992-2015: The Steady Descent in Aviation Fuel Consumption
2. EUROCONTROL, 2021, Forecast Update 2021-2027. European Flight Movements and Service Units. Three Scenarios for Recovery from COVID-19 [online]. Dostępny w: https://www.eurocontrol.int/publication/eurocontrol-forecast-update-2021-2027 (dostęp: 22.05.2022 r.).
3. European Environment Agency, 2017, Aviation and shipping – impacts on Europe's environ-ment. TERM 2017: Transport and Environment Reporting Mechanism (TERM) report [online]. Kopenhaga: European Environment Agency. Dostępny w: https://www.eea.europa.eu/publications/term-report-2017 (dostęp: 22.05.2022 r.).
4. European Environment Agency, 2019, Grunty i gleby: w kierunku zrównoważonego gospodarowania tymi niezbędnymi zasobami. Dostępny w: https://www.eea.europa.eu/pl/sygna142y/sygnaly-2019/artykuly/grunty-i-gleby-w-kierunku (dostęp: 22.05.2022 r.).
5. International Civil Aviation Organization, Waste Management at Airports. Dostępny w: https://www.icao.int/environmental-protection/documents/waste_management_at_airports_booklet.pdf (dostęp: 22.05.2022 r.).
6. International Civil Aviation Organization, 2019, Annual Report 2019. Presentation of 2019 Air Transport statistical results [online]. Dostępny w: https://www.icao.int/annual-report-2019/Documents/ARC_2019_Air%20Transport%20Statistics.pdf (dostęp: 22.05.2022 r.).
7. Skakuj M., Grabowska B., Zderzenia statków powietrznych z ptakami – ryzyko, którego nie unikniemy, ale które możemy minimalizować, ULC.
8. United States Environmental Protection Agency, 2008a, Integrated science assessment for oxides of nitrogen – health criteria, United States Environmental Protection Agency 2008.
9. United States Environmental Protection Agency, 2008b, Integrated science assessment for sulfur oxides – health criteria, United States Environmental Protection Agency 2008.
10. United States Environmental Protection Agency, 2012, Technical development document for the final effluent limitations guidelines and new source performance standards for the airport deicing category, Waszyngton: United States Environmental Protection Agency. Dostępny w: https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/airport-deicing-tdd-final-2012.pdf (dostęp: 22.05.2022 r.).

11. WHO and JRC, 2011, Burden of disease from environmental noise. Quantification of healthy life years lost in Europe [online], Geneva: World Health Organization. Dostępny w: https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0008/136466/e94888.pdf (dostęp: 22.05.2022 r.).
12. World Health Organization, 2018, Environmental noise guidelines for the European Region [online], Kopenhaga: World Health Organization, Regional Office for Europe. Dostępny w: https://www.who.int/europe/publications/i/item/9789289053563 (dostęp: 22.05.2022 r.).
13. www.cpk.pl
14. www.eea.europa.eu
15. www.eea.maps.arcgis.com
16. www.greenaironline.com
17. www.robinradar.com

ECOLOGICAL THREATS IN THE AIRPORT AREA AND THEIR IMPACT ON HUMAN HEALTH AND LIFE

Abstract

An airport is one of the infrastructure of air transport, and at the same time it is an element of critical infrastructure. As any element of critical infrastructure it is subject to protection. Among the threats occurring at the airport are ecological hazards. Sources of this type of threat include pollution by harmful compounds, noise emissions, water and soil pollution, and disturbance of biodiversity. Airport's impact on the environment includes both the influence on human health and life, as well as on the natural environment. The aim of this article was to discuss various aspects of the modern airport operations that are sources of ecological threats, specifying their impact on the human life quality and the condition of the environment.

Keywords: aviation, airport, critical infrastructure, ecological security

Damian JOACHIMIAK*
Tomasz BOROWCZYK**
Magda JOACHIMIAK*

MODEL PROCESU SPRĘŻANIA PARY WODNEJ W REAKTORZE TŁOKOWYM DEDYKOWANY DO WYSOKOCIŚNIENIOWYCH PROCESÓW CHEMICZNYCH

W pracy opisano model obliczeniowy umożliwiający symulację procesu sprężania pary wodnej suchej realizowanym w cylindrze, którego objętość regulowana jest położeniem tłoka. Właściwości pary wyznaczane są na podstawie autorskiego programu zawierającego tablice pary IAPWS-IF97. Do opracowania modelu wykorzystano teorię opisującą szybkie, adiabatyczne zmiany parametrów gazu w zbiorniku. Z uzyskanych danych wynika, że zmienność lepkości kinematycznej oraz wykładnika izentropy pary jest duża w analizowanym zakresie ciśnienia. W pracy przedstawiono cztery warianty modelu sprężania. Badano wpływ korygowania parametrów pary w procesie sprężania wynikających z przemian idealnych o uwzględnienie przecieków oraz przepływu ciepła pomiędzy parą a ściankami cylindra. Model pozwala określić wpływ przepływu ciepła oraz przecieków na możliwe do uzyskania parametry sprężonej pary. Uzyskane wyniki wskazują na duży wpływ przepływu ciepła na przebieg ciśnienia. Dzięki modelowi obliczeniowemu można zaprojektować geometrię reaktora tłokowego.

Słowa kluczowe: zgazowanie hydrotermalne, para wodna, układ tłok-cylinder, uszczelnienie labiryntowe, pierścienie uszczelniające

1. WPROWADZENIE

Woda w stanie pod- i nadkrytycznym może być wykorzystana w reakcjach syntezy chemicznej, produkcji nanocząstek czy też hydrotermlanego upłyniania (HTL) jak i zgazowania (HG) [Pińkowska 2007a, 2007b]. Wysokie ciśnienie (powyżej

* Instytut Energetyki Cieplnej
** Grupa inżynieryjna Konstrubowski

22 MPa) oraz temperatura (powyżej 375˚C) pary wodnej stanowi barierę technologiczną i ekonomiczną przed powszechnym jej wykorzystaniem [Jitka 2019]. Wykorzystanie zalet reaktora tłokowego stwarza możliwość uzyskania wysokich parametrów pary wodnej przy stosunkowo prostych rozwiązaniach konstrukcyjnych oraz niedużych nakładach inwestycyjnych [Ashok et al., 2021]. Ponadto umożliwia minimalizowanie czasu reakcji chemicznej, co w efekcie daje większą wydajność procesową [Hendry et al., 2012]. Głównym celem opracowania modelu sprężania pary wodnej w reaktorze tłokowym jest analiza parametrów termodynamicznych takich jak ciśnienie i temperatura odpowiadających stanowi okołokrytycznemu wody. Bezpośredni wpływ na możliwe do uzyskania parametry pary ma szczelność uszczelnienia tłok-cylinder. Branymi pod uwagę w badaniach rodzajami uszczelnień są uszczelnienia bezstykowe labiryntowo-rowkowe, których zastosowanie analizowano w pracach [Vetter, 1972a, 1972b; Graunke, 1985; Larjola et al., 2010; Hao, Ju i Lu, 2011; Feng et al., 2018], szczelinowe (Melnik, 2009, 2010, 2013; Joachimiak i Krzyślak, 2016) oraz stykowe jakimi są pierścienie kompresyjne [Lyubarskyy i Bartel, 2016]. W przypadku uszczelnień bezstykowych parametrami geometrycznymi mającymi wpływ na przeciek są luz nominalny, długość, liczba i wymiary komór [Vetter, 1972a; Graunke i Ronnert, 1984; Graunke, 1985; Larjola et al., 2010; Hao, Ju i Lu, 2011; Lyubarskyy i Bartel, 2016; Feng et al., 2018; Joachimmiak i Krzyslak, 2019]. Na szczelność uszczelnienia złożonego z pierścieni kompresyjnych ma wpływ kształt powierzchni gładzi ślizgowej, liczby pierścieni i geometria tzw. zamków [Wolff, 2013].

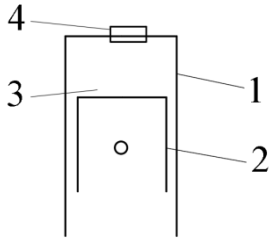
W celu zaprojektowania reaktora tłokowego niezbędne jest opracowanie modelu procesu sprężania. Model ten będzie uwzględniał parametry pary wodnej na podstawie tablic pary IAPWS-IF97 [Kretzschmar i Wagner, 2019]. Podczas sprężania pary w reaktorze tłokowym będą zachodzić bardzo szybkie w czasie zmiany ciśnienia, temperatury oraz wartości przecieków czynnika roboczego. Wartości te będą w istotny sposób zależały od przepływu ciepła od czynnika roboczego (pary) do ścianek komory sprężania reaktora (są to powierzchnie tulei cylindrowej, głowicy i denka tłoka) oraz prędkości tłoka.

2. MODEL OBLICZENIOWY

Reaktor tłokowy składa się z tulei cylindrowej (1), tłoka (2), komory sprężania (3), oraz układu zaworów (4) (rys. 1). Podczas przesuwania się tłoka w tulei cylindrowej dochodzi do sprężanie pary wodnej. Model obliczeniowy pozwala na wyznaczenie parametrów sprężanej pary wodnej z krokiem co 1 mm przesuwu tłoka (rys. 2). Model ten zaprogramowano w taki sposób aby można było przeprowadzać obliczenia teoretyczne procesu sprężania:

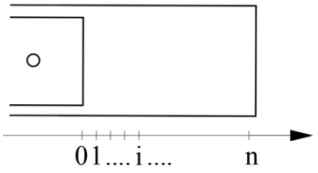
- bez uwzględnienia przecieków i przepływu ciepła,

- z uwzględnieniem przecieków,
- z uwzględnieniem przepływu ciepła,
- z uwzględnieniem przecieków oraz przepływu ciepła.



Rys. 1. Schemat reaktora tłokowego, 1 - cylinder, 2 - tłok, 3 - komora sprężania, 4- układ zaworów

W obliczeniach wykorzystano autorski program ST_IF97 do wyznaczania parametrów pary. Program ten napisano w języku fortran i jest on oparty o "ASME International Steam Tables for Industrial Use" [Kretzschmar i Wagner, 2019]. Na początku obliczeń założono doprowadzenie pary suchej zaworem ssącym do cylindra (1, rys. 1) o początkowym ciśnieniu 200 kPa.



Rys. 2. Punkty obliczeniowe

Na podstawie ciśnienia początkowego p(1) przy użyciu programu ST_IF97 wyznaczono parametry pary nasyconej suchej (x=1) dla początkowego położenia tłoka

$$p(1)ST_IF97 \rightarrow T(1), \varrho(1), h(1), a(1), c_p(1), c_v(1), s(1), \mu(1), \upsilon(1), \lambda(1) \quad (1)$$

Temperatura oraz pozostałe parametry pary dla początkowego punktu obliczeniowego (i=1) wynikają z właściwości pary nasyconej suchej (x = 1). Ciśnienie gazu dla kolejnych i-tych punktów obliczeniowych (położeń tłoka według rys. 2) wyznaczono przy założeniu szybko zachodzącej przemiany izentropowej

$$p(i) = p(i-1)\left(\frac{V_{cyl}(i-1)}{V_{cyl}(i)}\right)^{\kappa(i-1)} \quad (2)$$

Temperatura gazu dla kolejnych i-tych punktów obliczeniowych (położeń tłoka) również jest wyznaczana na podstawie przemiany izentropowej

$$T(i) = T(i-1)\left(\frac{p(i)}{p(i-1)}\right)^{\frac{\kappa(i-1)-1}{\kappa(i-1)}} \quad (3)$$

Dla kolejnych kroków obliczeniowych (położeń tłoka) i = 2, 3, ..., n parametry pary takie jak gęstość, entalpia właściwa, prędkość dźwięku, ciepło właściwe przy

stałym ciśnieniu, ciepło właściwe przy stałej objętości, entropia, lepkość dynamiczna, lepkość kinematyczna i współczynnik przewodzenia ciepła wyznaczane są na podstawie ciśnienia i temperatury z wykorzystaniem programu ST-IF97, co zapisano symbolicznie

$$\mathrm{p(i)}, \mathrm{T(i)} \xrightarrow{\text{ST-IF97}} \varrho(\mathrm{i}), \mathrm{h(i)}, \mathrm{a(i)}, \mathrm{c_p(i)}, \mathrm{c_v(i)}, \mathrm{s(i)}, \mu(\mathrm{i}), \nu(\mathrm{i}), \lambda(\mathrm{i}) \tag{4}$$

Masę gazu zawartą w cylindrze obliczono zgodnie ze wzorem

$$m_{cyl}(i) = V_{cyl}(i)\varrho(i) \tag{5}$$

Wykładnik izentropy jest zmienny dla pary wodnej. Opisano go zależnością

$$\kappa(i) = \frac{a(i)^2}{p(i)\nu(i)} \tag{6}$$

Model obliczeniowy pozwala na wyznaczenie w każdym i-tym kroku obliczeniowym teoretyczny przebieg parametrów pary wodnej podczas sprężania w reaktorze tłokowym. Wartości parametrów wynikają z przemian izentropowych oraz właściwości pary. Powyżej opisano wersję bazową modelu w którym założono idealnie szczelny cylinder oraz pominięto przepływ ciepła pomiędzy parą wodną a ściankami cylindra. Sterując pracą modelu można uwzględnić przeciek pary w uszczelnieniu tłok-cylinder poprzez włączenie podprogramu, który wyznacza przeciek dla konkretnego typu uszczelnienia. Można również uwzględnić wpływ przepływu ciepła poprzez włączenie podprogramu w którym wybiera się model przepływu ciepła.

2. 1. Model uwzględniający przeciek

Model obliczeniowy umożliwia wyznaczenie wartości przecieku dla różnych typów uszczelnień (szczelinowe, pierścienie uszczelniające). Do programu wprowadzane są dane dotyczące typu uszczelnienia oraz geometrii takie jak średnica cylindra, wysokość tłoka, wysokość szczeliny. W każdym kroku obliczeniowym na podstawie aktualnego ciśnienia, temperatury, gęstości pary oraz wykładnika izentropy obliczana jest masa pary wodnej wypływająca przez uszczelnienia w czasie i-tego kroku obliczeniowego $m_l(i)$, co ideowo zapisano poniżej

$$typ\ uszczelnienia, D_{cyl}, H_{pis}, p(i), T(i), \varrho(i), \kappa(i) \xrightarrow{Model\ obliczeniowy} \dot{m}_l(i)$$

Ilość gazu, która wypłynęła z cylindra przez uszczelnienia w czasie Δt opisano zależnością

$$m_l(i) = \dot{m}_l(i)\Delta t(i) \tag{7}$$

Jeżeli prędkość tłoka będzie zmienna to wartość Δt dla każdego *i*-tego kroku czasowego będzie różna. Skorygowaną ilość gazu w cylindrze dla każdego kroku obliczeniowego o wartość przecieku opisano zależnością

$$m_{cyl,l}(i) = m_{cyl}(i) - m_l(i) \tag{8}$$

Korekta ciśnienia gazu w cylindrze wynikająca z przecieku wyznaczano z założeniem szybkiej przemiany adiabatycznej

$$p(i) = p(i)\left(\frac{m_{cyl,l}(i)}{m_{cyl}(i)}\right)^{\kappa(i)} \tag{9}$$

natomiast korektę temperatury gazu w cylindrze wynikającą ze zmiany masy zawartej w cylindrze opisano wzorem

$$T(i) = T(i)\left(\frac{m_{cyl,l}(i)}{m_{cyl}(i)}\right)^{\kappa(i)-1} \tag{10}$$

Dla kolejnej iteracji obliczeń przyjmowano wartość masy pary w cylindrze skorygowaną o wartość przecieku

$$m_{cyl}(i) = m_{cyl,l}(i) \tag{11}$$

Podprogram dla każdego położenia tłoka wyznacza przeciek w sposób iteracyjny.

4.1. Model uwzględniający przepływ ciepła

W kolejnym wariancie modelu obliczeniowego uwzględniono wpływ przepływu ciepła pomiędzy sprężaną parą a ściankami cylindra na parametry pary wodnej w każdym kroku obliczeniowym. Do tego celu z programu ST_IF97 pobierane są parametry takie jak gęstość, lepkość dynamiczna i kinematyczna, współczynnik przewodzenia ciepła oraz liczba Prandtla dla pary $(\varrho(i), \mu(i), \upsilon(i), \lambda(i), \mathrm{Pr}(i))$. Liczbę Reynoldsa w *i*-tym punkcie obliczeniowym wyznaczano na podstawie chwilowej prędkości tłoka

$$Re(i) = \frac{c_{pis}(i)D_{cyl}}{\nu(i)} \tag{12}$$

Wysokość cylindra nad denkiem tłoka $H_{cyl}(i)$ jest inna dla każdego kroku obliczeniowego. Pomiędzy gazem zawartym w cylindrze a ściankami cylindra (w tym denkiem tłoka) przepływa ciepło. Powierzchnię przepływu ciepła stanowi powierzchnia boczna cylindra oraz powierzchnia denka tłoka i głowicy, którą określa zależność

$$A_{g-w}(i) = 2 * 0.25\pi D_{cyl}^2 + \pi D_{cyl}H_{cyl}(i) \tag{14}$$

W celu określenia ilości przepływu ciepła pomiędzy gazem a ściankami wykorzystano podprogram *Model_HT-zg*. Na podstawie geometrii uszczelnienia, ciepła właściwego przy stałym ciśnieniu, lepkości dynamicznej, współczynnika przewodzenia ciepła, liczb Reynoldsa oraz Prandtla wyznacza się współczynnik przejmowania ciepła pomiędzy parą a ściankami cylindra

$$D_{cyl}, h_{cyl}(i), c_p(i), \mu(i), \lambda(i), Re(i), Pr(i) \xrightarrow{Model_HT-zg} \alpha(i) \tag{15}$$

Ciepło zawarte w gazie opisano wzorem

$$Q_{cyl}(i) = m_{cyl}(i)h(i) \tag{16}$$

Ilość ciepła przepływającego pomiędzy gazem a ściankami ograniczającymi cylinder o temperaturze $T_w(i)$ obliczano na podstawie zależności

$$Q_{g-w}(i) = \alpha(i) A_{g-w}(i)[T(i) - T_w(i)]\Delta t(i) \quad (17)$$

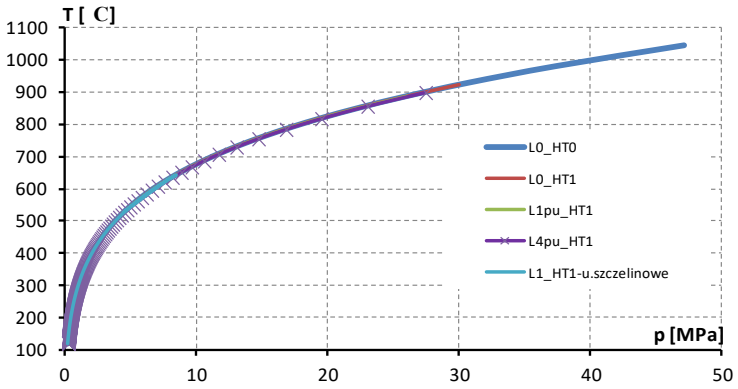
Na podstawie znanej ilości ciepła przepływającej pomiędzy gazem a ściankami komory sprężania w i-tym kroku czasowym korygowana jest temperatura gazu w cylindrze. Wskutek zmiany temperatury korygowane jest również ciśnienie gazu. Siła wywierana na denko tłoka wynosi

$$F(i) = A_{pis} p(i) \quad (22)$$

Obliczenia wykonywane są iteracyjnie dla położenia tłoka co 1 mm. Model uwzględnia zmienność parametrów pary wodnej, która ma istotny wpływ na wyniki. Kod programów zapisano w języku Fortran.

3. WYNIKI OBLICZEŃ

Początkowe reakcje wielu wysokociśnieniowych procesów chemicznych (w tym reakcje reformingu parowego oraz konwersji tlenku węgla z parą wodną) są procesem endotermicznym. Energia potrzebna do zainicjowania reakcji jest pobierana z uzyskanej energii pary wynikająca z efektu procesu sprężania [Pińkowska 2007b]. Na skutek wzrostu ciśnienia rośnie temperatura pary wodnej. Poniżej przedstawiono analizę zmiany ciśnienia i temperatury dla różnych wariantów obliczeniowych.

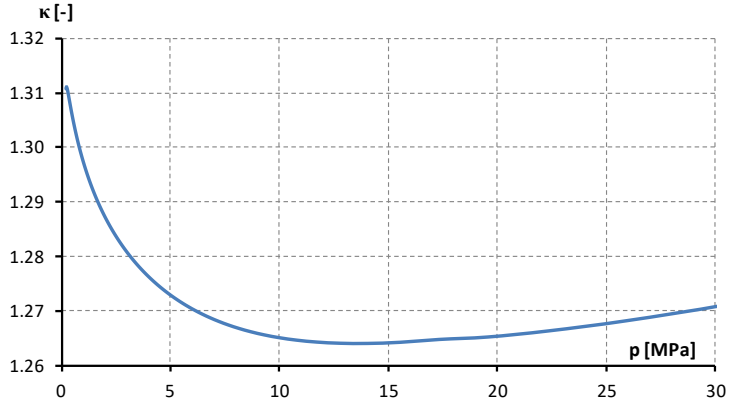


Rys. 3. Przebieg temperatury pary wodnej w funkcji ciśnienia dla różnych wariantów modelu

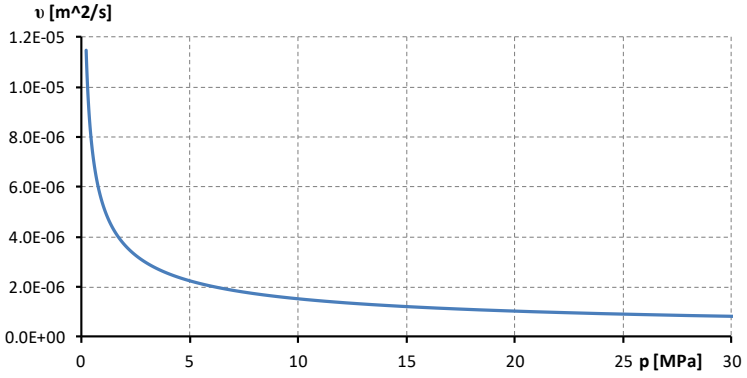
Proces sprężania symulowano od ciśnienia początkowego pary równego 200 kPa. Zmiany temperatury w zależności od ciśnienia mają identyczny przebieg dla różnych wariantów obliczeń. Uzyskane wyniki różnią się ciśnieniem końcowym. Dla przypadku kiedy pominięto przecieki i przepływ ciepła ciśnienie końcowe przekracza 45 MPa. W kolejnej części pracy przedstawiono zmienność parametrów pary w maksymalnym możliwym do uzyskania zakresie ciśnienia i temperatury pary wodnej.

3.1. Analiza zmiany parametrów termodynamicznych pary wodnej podczas idealnego procesu sprężania, bez przecieków i przepływu ciepła (L0_HT0)

Duża zmienność wykładnika izentropy w procesie sprężania potwierdza konieczność obliczeń iteracyjnych z zastosowaniem programu ST_IF97, który w każdym i-tym kroku obliczeniowym umożliwia dokładne obliczenie parametrów termodynamicznych pary wodnej (rys. 4).

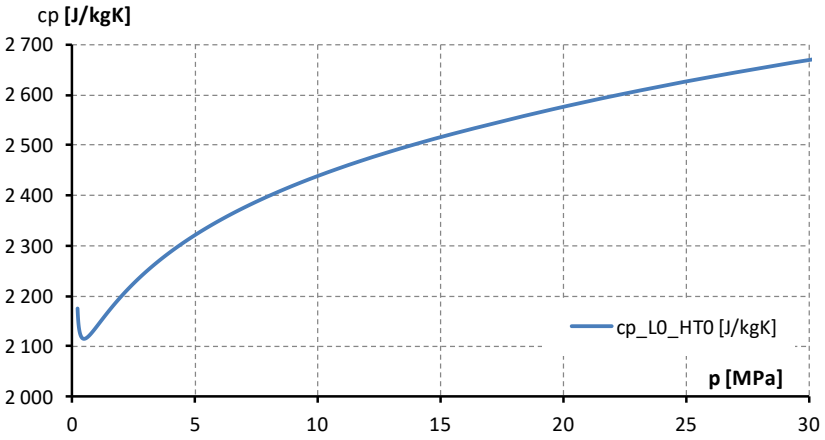


Rys. 4. Wykładnik izentropy w funkcji ciśnienia



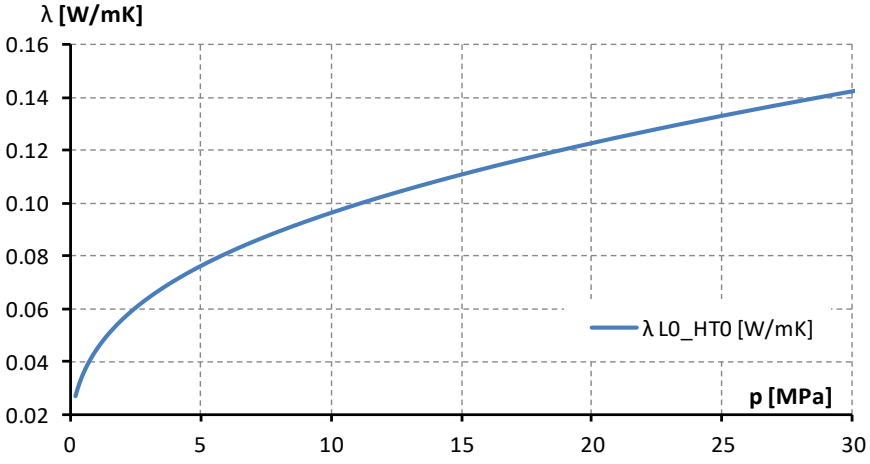
Rys. 5. Lepkość kinematyczna w funkcji ciśnienia

Lepkość kinematyczna pary wodnej znacząco spada ze wzrostem ciśnienia (rys. 5). Zależność ta powoduje zwiększenie liczby Reynoldsa (12) w końcowej części suwu sprężania, co ma pozytywny wpływ na proces zgazowania. Duża liczba Reynoldsa czynnika roboczego zawartego w komorze sprężania umożliwia przyśpieszenie reakcji zgazowania. Szczególnie jest to istotne przed GMP, kiedy tłok zwalnia.



Rys. 6. Ciepło właściwe w funkcji ciśnienia

W początkowym etapie sprężania ciepło właściwe maleje, osiągając minimum dla ciśnienia 1 MPa. Dalej ze wzrostem ciśnienia rośnie ciepło właściwe pary wodnej (rys. 6).



Rys. 7. Współczynnik przewodzenia ciepła w funkcji ciśnienia

Znaczący wzrost współczynnika przewodzenia ciepła pod koniec suwu sprężania (rys. 7) powoduje zwiększenie się wartości współczynnika dyfuzyjności termicznej. W efekcie sprężona para wodna będzie miała wyrównaną temperaturę w objętości cylindra pod koniec suwu sprężania.

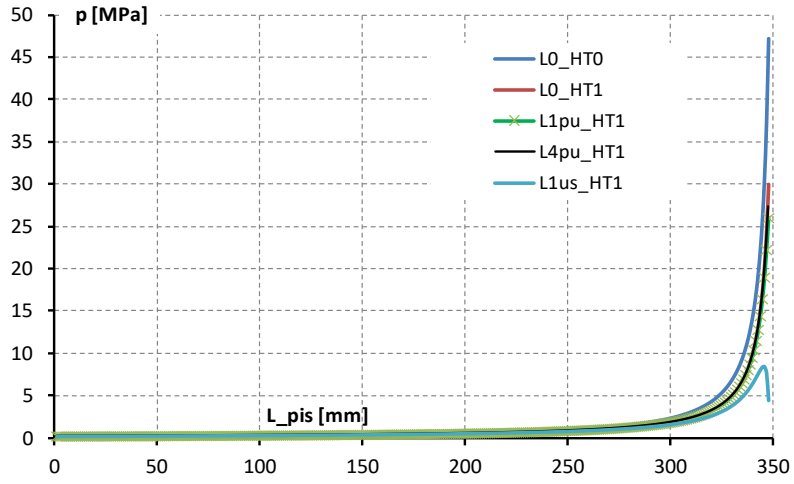
3.2. Analiza zmienności parametrów termodynamicznych pary wodnej w cylindrze reaktora tłokowego podczas sprężania z uwzględnieniem rzeczywistych warunków

W tej części pracy dokonano analizy zmienności parametrów termodynamicznych pary dla-następujących wariantów procesu sprężania:
L0 – nie uwzględniono przecieku,
L1pu – uwzględniono przeciek przez jeden pierścień uszczelniający,
L4pu – uwzględniono przeciek przez cztery pierścienie uszczelniające,
L1us – uwzględniono przeciek przez uszczelnienie szczelinowe,
HT0 – nie uwzględniono przepływu ciepła od pary do ścianki cylindra,
HT1 – uwzględniono przepływ ciepła od pary do ścianki cylindra.

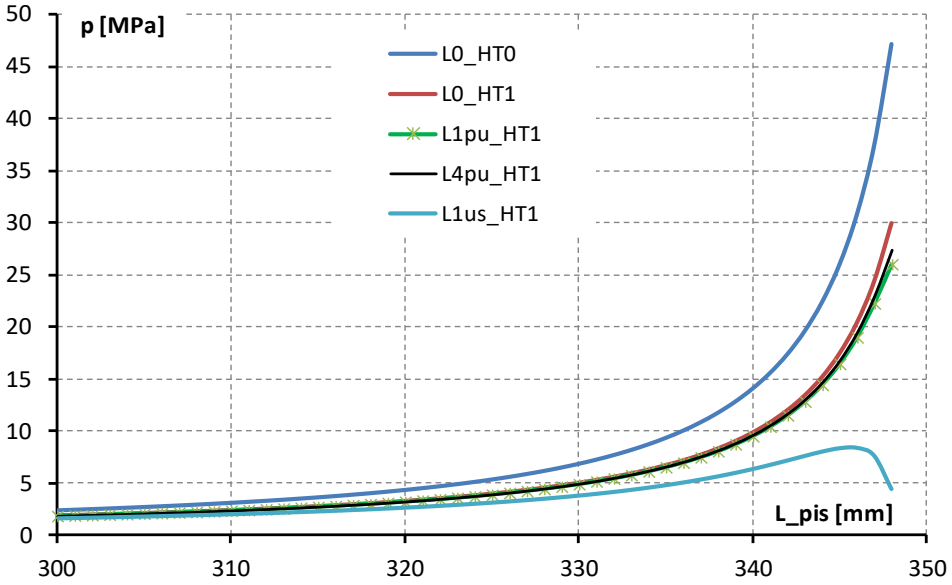
Analiza powyższych przypadków umożliwia określenie jakie czynniki (szczelność komory, przepływ ciepła) mają kluczowy wpływ na poszczególne parametry termodynamiczne podczas sprężanej pary wodnej.

W przypadku idealnego procesu sprężania (L0_HT0), zakładając całkowicie szczelny cylinder oraz pomijając przepływ ciepła pomiędzy parą a ściankami, pod koniec suwu sprężania można uzyskać bardzo wysokie ciśnienie powyżej 45 MPa (rys. 8) oraz stosunkowo wysoką temperaturę (rys. 9) powyżej 1000°C. Przyrost temperatury wynika tylko z efektu sprężenia, im wyższy przyrost ciśnienia tym wyższy przyrost temperatury.

a)

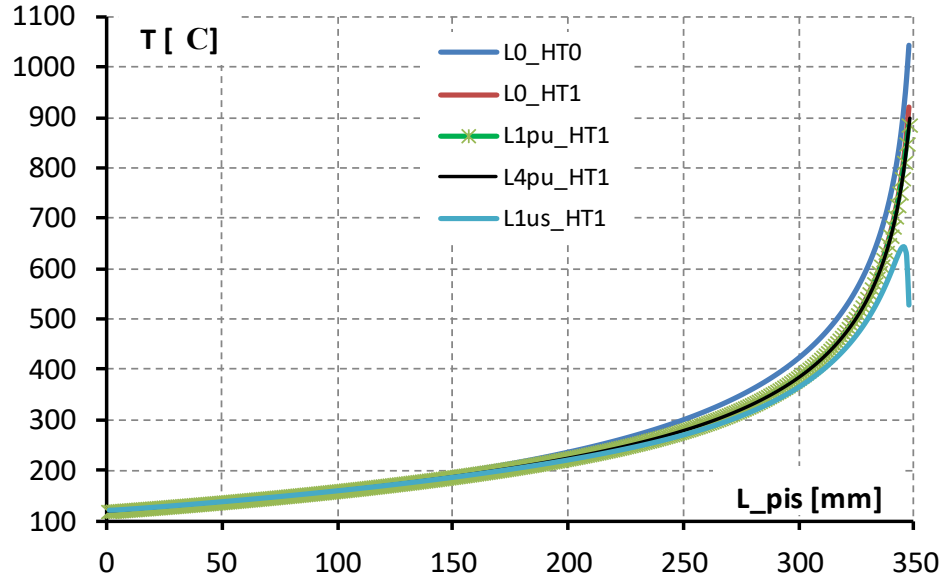


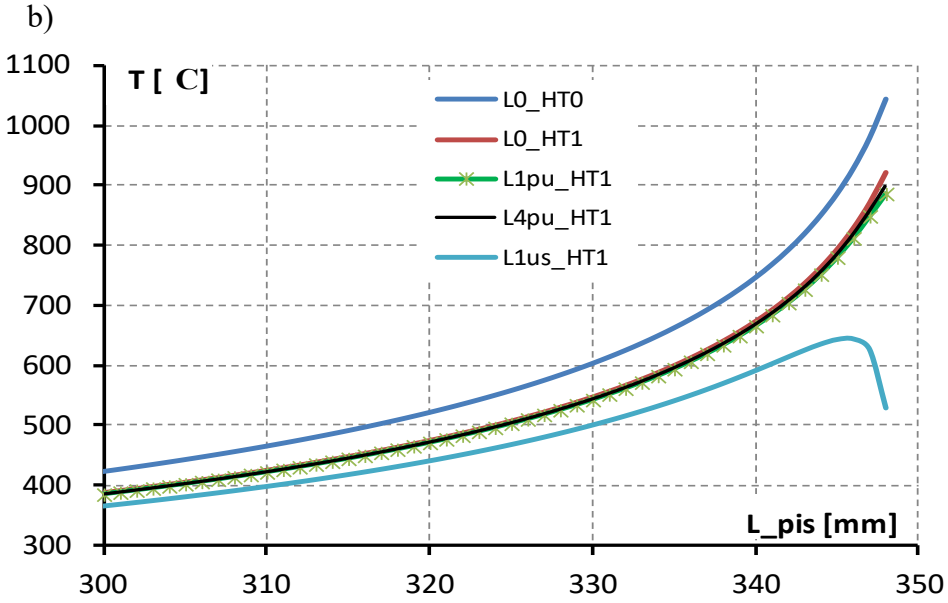
b)



Rys. 8. Ciśnienie pary wodnej w funkcji położenia tłoka dla różnych wariantów modelu obliczeniowego dla L_pis (a) od 0 do 350 mm (b) od 300 do 350 mm

a)

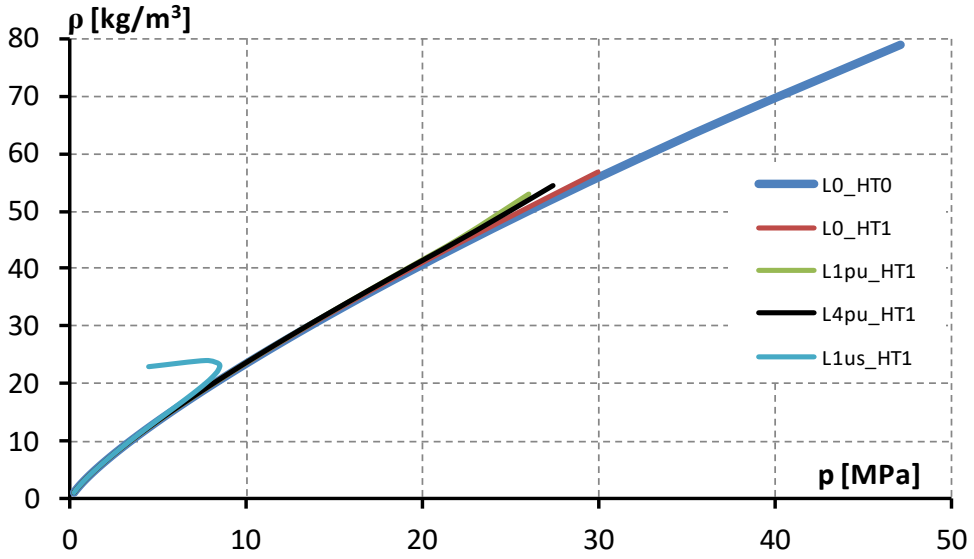




Rys. 9. Temperatura pary wodnej w zależności od położenia tłoka dla różnych wariantów modelu obliczeniowego dla L_tłoka (a) od 0 do 350 mm (b) od 300 do 350 mm

Dla sprężania z uwzględnieniem przepływu ciepła od pary do ścianek cylindra (L0_HT1) uzyskano znacznie mniejsze ciśnienie końcowe w odniesieniu od przypadku idealnego (L0_HT0) osiągające 30 MPa oraz nieznacznie niższą temperaturę przekraczającą 900°C. Z porównania rozkładu ciśnienia oraz temperatury pomiędzy przypadkami L0_HT0 oraz L0_HT1 wynika, że wpływ korekty ciśnienia wynikający przepływu ciepła jest bardzo istotny i nie może być pominięty. Sprężanie z uwzględnieniem przecieku przez uszczelnienia złożone z jednego pierścienia kompresyjnego umożliwiło uzyskanie ciśnienia końcowego przekraczającego 25 MPa oraz temperaturę około 900°C. Natomiast zastosowanie tylko uszczelnienia szczelinowego gładkiego powoduje znaczące przecieki które w efekcie pozwalają uzyskać maksymalne ciśnienie rzędu 8 MPa które następnie zmniejsza się w końcowej części suwu sprężania i osiąga poniżej 5 MPa w górnym martwym punkcie (GMP) tłoka.

Dla wariantu z uszczelnieniem szczelinowym (L1SF_HT1) przed osiągnięciem ciśnienia 9 MPa (pod koniec procesu sprężania, rys. 10) ciśnienie oraz gęstość maleje. Jest to spowodowane znacznym wzrostem przecieku przez uszczelnienie szczelinowe. Dla pozostałych wariantów w początkowym etapie procesu sprężania do ciśnienia około 20 MPa gęstość pary ma identyczny przebieg. Dla ciśnienia powyżej 20 MPa gęstość pary ma nieznacznie różniące się przebiegi.



Rys. 10. Gęstości pary wodnej w funkcji ciśnienia dla różnych wariantów modelu obliczeniowego

4. PODSUMOWANIE

Przedstawione w pracy wyniki udowadniają, że w odpowiednio uszczelnionym układzie tłok cylinder można uzyskać parę wodną o parametrach około i nadkrytycznych. Na temperaturę pod koniec suwu sprężania ma bezpośredni wpływ ciśnienie pary w komorze reaktora oraz znaczący wpływ ma przepływ ciepła pomiędzy parą a ściankami cylindra. Można stwierdzić, że zastosowanie uszczelnienia szczelinowego o gładkich ściankach umożliwia uzyskanie ograniczonych parametrów pary. Pod koniec suwu sprężania, kiedy ciśnienie pary osiąga 8.4 MPa wartość przecieku rośnie znacząco i pomimo dalszego ruchu tłoka ciśnienie pary maleje. W przypadku precyzyjnego prowadzenia tłoka w osi cylindra zaletą zastosowania uszczelnienia szczelinowego jest możliwość całkowitego wyeliminowania tarcia pomiędzy tłokiem a cylindrem. Jeżeli w konstrukcji reaktora tłokowego istotne będzie zastosowanie bezkontaktowego uszczelnienia, to w celu zmniejszenia przecieku należy zastosować uszczelnienie labiryntowe rowkowe. Dane z literatury dają przesłanki że uszczelnienie tego typu może charakteryzować się znacznie mniejszym przeciekiem. Uszczelnienie tłok cylinder złożone z jednego lub kilku pierścieni uszczelniających umożliwia uzyskanie wysokich parametrów pary. Jednak tego typu uszczelnienie wymaga wytworzenia filmu olejowego pomiędzy tło-

kiem a cylindrem. Parametry występujące na końcu procesu sprężania można regulować ciśnieniem początkowym pary oraz prędkością i wartością suwu tłoka.

Oznaczenia:

A – pole powierzchni [m2]
a – prędkość dźwięku [m/s]
c_{pis} – prędkość tłoka [m/s]
c_p – ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu [J/kgK]
c_v – ciepło właściwe przy stałej objętości [J/kgK]
D – średnica cylindra [m]
F – siła [N]
H – wysokość [m]
h – entalpia właściwa, [J/kg]
i – i-ta iteracja, krok obliczeniowy
l – obliczenia z uwzględnieniem przecieku
L_pis – droga tłoka [m]
m – masa [kg]
$\dot{m}_l$ – strumień masy [kg/s]
p – ciśnienie [Pa]
R – indywidualna stała gazowa [J/kgK]
Re – Liczba Reynoldsa
s – entropia [J/kgK]
T – temperatura [K]
t – czas [s]
V – objętość [m3]
v – objętość właściwa [m3/kg]
HT – parametr uwzględniający przepływ ciepła

Oznaczenia wariantów obliczeń:

HT0 – nie uwzględnienie przepływu ciepła od pary do ścianki
HT1 – uwzględnienie przepływu ciepła od pary do ścianki
L0 – nie uwzględnienie przecieków
L1pu – uwzględnienie przecieku przez jeden pierścień uszczelniający
L1pu – uwzględnienie przecieku przez cztery pierścienie uszczelniające
L1us – uwzględnienie przecieku przez uszczelnienie szczelinowe

symbole greckie

λ – współczynnik przewodzenia ciepła [W/mK]
κ – wykładnik izentropy [-]
ρ – gęstość [kg/m3]
ν – lepkość kinematyczna [m2/s]
μ – lepkość dynamiczna [m2/s]
Δ – elementarny przyrost [-]

Indeksy
cyl – cylindra
l – przeciek (leakage)
pis – tłok (piston)
g-w – parametr dotyczący przepływu ciepła pomiędzy parą a ściankami cylindra

LITERATURA

1. Pińkowska, H. Niskotemperaturowe zgazowanie biomasy w wodzie w stanie pod- I nadkrytycznym. *Przem. Chem.* 2007, *86*.
2. Pińkowska, H. Wysokotemperaturowe zgazowanie biomasy w wodzie w stanie nadkrytycznym. *Przem. Chem.* 2007, *86*.
3. Jitka, H. *Status report on thermal gasification of biomass and waste. Task 33 special report.*; 2019;
4. Ashok, A.; Katebah, M.A.; Linke, P.; Kumar, D.; Arora, D.; Fischer, K.; Jacobs, T.; Al-Rawashdeh, M. Review of piston reactors for the production of chemicals. *Rev. Chem. Eng.* 2021.
5. Hendry, D.; Miller, A.; Jacoby, W. Turbulent operation of a continuous reactor for gasification of alcohols in supercritical water. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2012, *51*, doi:10.1021/ie201887e.
6. Vetter, H. Oilfree labyrinth piston compressor. 1972.
7. Graunke, K. Labyrinth leakage flow in a labyrinth-piston compressor. *Sulzer Tech. Rev.* 1985.
8. Larjola, J.; Honkatukia, J.; Sallinen, P.; Backman, J. Fluid dynamic modeling of a free piston engine with labyrinth seals. *J. Therm. Sci.* 2010, *19*, 141–147, doi:10.1007/s11630-010-0141-2.
9. Vetter, H. Oilfree labyrinth piston compressor. 1972.
10. Feng, J.; Wang, L.; Yang, H.; Peng, X. Numerical Investigation on the Effects of Structural Parameters of Labyrinth Cavity on Sealing Performance. *Math. Probl. Eng.* 2018, *2018*, 1–12, doi:10.1155/2018/5273582.
11. Hao, X.H.; Ju, Y.L.; Lu, Y.J. Experimental study on the sealing clearance between the labyrinth sealing displacer and cylinder in the 10 K G-M refrigerator. *Cryogenics (Guildf).* 2011, doi:10.1016/j.cryogenics.2011.02.002.
12. Melnik, V.A. Computed Universal Dependence for Determining Leakage of Media Through Groove Seals. *Chem. Pet. Eng.* 2013, *48*, 751–759, doi:10.1007/s10556-013-9691-y.
13. Melnik, V.A. Calculating leaks in rotor-machine radial slot seals. Part 2. A method for integral slot flow rate constants. *Chem. Pet. Eng.* 2009, *45*, 702–706, doi:10.1007/s10556-010-9265-1.

14. Melnik, V.A. Calculating leaks in rotary machineradial slot seals. part 3. method for calculating leakstaking account of the inlet section. *Chem. Pet. Eng.* 2010, *46*, 146–152, doi:10.1007/s10556-010-9308-7.
15. Joachimiak, D.; Krzyślak, P. A model of gas flow with friction in a slotted seal. *Arch. Thermodyn.* 2016, *37*, 95–108, doi:10.1515/aoter-2016-0022.
16. Lyubarskyy, P.; Bartel, D. 2D CFD-model of the piston assembly in a diesel engine for the analysis of piston ring dynamics, mass transport and friction. *Tribol. Int.* 2016, *104*, 352–368, doi:10.1016/j.triboint.2016.09.017.
17. Joachimmiak, D.; Krzyslak, P. Analysis of the Gas Flow in a Labyrinth Seal of Variable Pitch. *J. Appl. Fluid Mech.* 2019, *12*, 921–930, doi:10.29252/jafm.12.03.29074.
18. Graunke, K.; Ronnert, J. Dynamic behaviour of labyrinth seals in oilfree labyrinth-piston compressors. 1984.
19. Wolff, A. *Modelowanie procesów przepływowych w układzie tłok-pierścienie-cylinder silnika spalinowego*; Prace Nauk.; Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej: Warszawa, 2013;
20. Kretzschmar, H.-J.; Wagner, W. *International Steam Tables*; Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 2019; ISBN 978-3-662-53217-1.

STEAM COMPRESSION PROCESS MODEL IN A PISTON REACTOR DEDICATED TO HIGH-PRESSURE CHEMICAL PROCESSES

Abstract

This paper describes a computational model that enables simulation of a steam compression process carried out in a cylinder whose volume is controlled by the piston of the position. The steam properties are determined on the basis of the author's program containing IAPWS-IF97 steam tables. The theory describing fast adiabatic changes of gas parameters in the tank was used to develop the model. The data obtained show that the variation of kinematic viscosity and the exponent of the vapour isentropy is large in the analysed pressure range. In this paper, four variants of the compression model are presented. The effect of correcting the steam parameters in the compression process resulting from ideal transformations was studied taking into account leaks and heat transfer between the steam and the cylinder walls. The model allows one to determine the effect of heat flow and leakage on the achievable parameters of compressed steam. The results obtained show the large influence of heat flow on the pressure range. With the computational model, the geometry of the piston reactor can be designed.

Keywords: hydrothermal gasification, steam, piston-cylinder system, labyrinth seal, sealing rings

Magda JOACHIMIAK*
Damian JOACHIMIAK*
Aleksander OLEJNIK**
Michał CIAŁKOWSKI*

WPŁYW WŁAŚCIWOŚCI TERMOFIZYCZNYCH STALI NA PRECYZYJNE WYZNACZENIE WARUNKÓW BRZEGOWYCH W CZASIE NAGRZEWANIA W PIECU DO OBRÓBKI CIEPLNO-CHEMICZNEJ

Obróbka cieplno-chemiczna charakteryzuje się nagrzewaniem i chłodzeniem elementów maszyn wchodzących w skład infrastruktury krytycznej w szerokim zakresie temperatury. Kontrola temperatury brzegu nagrzewanych elementów jest niezbędna do wytworzenia powierzchni o dużej odporności na zużycie, co wiąże się z niezawodną pracą tych elementów. Współczynnik przewodzenia ciepła oraz ciepło właściwe dla stali wykazują dużą zmienność w zależności od temperatury. Może mieć to znaczący wpływa na wartości warunków brzegowych (temperatura, gęstość strumienia ciepła, współczynnik przejmowania ciepła) uzyskanych poprzez rozwiązanie zagadnienia odwrotnego dla równania przewodzenia ciepła. W pracy przedstawiono porównanie wyników rozwiązania zagadnienia odwrotnego dla dwóch modeli obliczeniowych. W pierwszym modelu założono stałą, uśrednioną wartość współczynnika przewodzenia ciepła i ciepła właściwego. W drugim modelu uwzględniono ich zmienność w funkcji temperatury.

Słowa kluczowe: obróbka cieplno-chemiczna, zagadnienie odwrotne, zmienność właściwości termofizycznych

Spis oznaczeń

c	ciepło właściwe, [J/kgK]
div	dywergencja, [-]
f	temperatura na brzegu walca, [^{o}C]
r	promień, [m]
R	promień maksymalny, [m]

* Instytut Energetyki Cieplnej, Politechnika Poznańska
**Wydział Mechatroniki i Lotnictwa, Wojskowa Akademia Techniczna

t czas, [s]
T temperatura, [°C]
q gęstość strumienia ciepła, [W/m^2]
Greckie symbole:
α radiacyjno-konwekcyjny współczynnik przejmowania ciepła [W/m^{2}K]
∇ gradient, [-]
λ współczynnik przewodzenia ciepła dla walca, [W/mK]
ρ gęstość, [kg/m^3]
Indeks dolny:
0 czas początkowy, dla $t = 0$
1 dla modelu obliczeniowego 1
2 dla modelu obliczeniowego 2
b na brzegu
g gazu

1. WPROWADZENIE

W skład infrastruktury krytycznej wchodzi wiele urządzeń i maszyn a ich niezawodność jest determinowana niezawodnością poszczególnych elementów. Zbadanie wpływu obciążeń termicznych różnych składowych elementów (wały, koła zębate itp.) na ich żywotność odgrywa podstawową rolę w planowaniu żywotności całych konstrukcji. Jednym z elementów wpływających na żywotność części maszyn poracujacych w warunkach tarcia jest obróbka cieplno-chemiczna. Elementy maszyn i urządzeń takie jak koła zębate czy wały korbowe są poddawane obróbce cieplno-chemicznej (azotowanie). Celem obróbki jest uzyskanie powierzchni odpornej na zużycie pozwalającej na bezawaryjną pracę elementów przez założony czas. Precyzyjna kontrola procesu obróbki cieplno-chemicznej pozwala na uzyskanie powierzchni o żądanych właściwościach bez uszkodzeń elementów wynikających ze zbyt dużych naprężeń termicznych podczas nagrzewania i chłodzenia [Joachimiak et al. 2019, Joachimiak 2021]. Kontrola warunków brzegowych w postaci temperatury, gęstości strumienia ciepła lub współczynnika przejmowania ciepła w piecu może odbywać się poprzez pomiar temperatury w ciele stałym (obrabiany element wsadu) oraz gazu . W kolejnym etapie dane te mogą posłużyć do rozwiązania zagadnienia odwrotnego dla równania przewodnictwa ciepła [Joachimiak et al. 2019, Joachimiak 2021, Joachimiak i Frąckowiak 2020, Judt 2020]. Zagadnienie odwrotne jest problemem źle postawionym [Frąckowiak et al. 2019, Hadamard 1902]. Oznacza to że niewielkie zaburzenie danych wejściowych może skutkować znaczną zmianą wyniku [Ciałkowski et al. 2022, Frąckowiak, von Wolfersdorf i Ciałkowski 2019, Joachimiak 2020, Joachimiak, Ciałkowski i Frąckowiak 2020, Mukanova 2013, Taler 1995, Yaparova 2014]. Powstaje pytanie na ile złożonym modelem obliczeniowym należy posłużyć się podczas analizy przepływu ciepła w elementach złożonych takich jak koła zębate czy wały korbowe.

Pierwszym etapem badań numerycznych dotyczących tego zagadnienia jest porównanie warunków brzegowych uzyskanych dla liniowego i nieliniowego problemu przepływu ciepła w walcu. Dotychczas modele rozwiązania zagadnienia odwrotnego przewodzenia ciepła dla walca nie uwzględniające zmienności współczynnika przewodzenia ciepła i ciepła właściwego od temperatury opisano w pracach [Joachimiak i Ciałkowski 2014, 2018], natomiast uwzględniające zmienność tych parametrów w pracach [Joachimiak et al. 2019, Joachimiak i Ciałkowski 2017].

2. MODEL OBLICZENIOWY

Przewodzenie ciepła w ciele stałym o zmiennych własnościach termofizycznych zależnych od temperatury opisuje równanie

$$\rho(T)c(T)\frac{\partial T}{\partial t} = div\left(\lambda(T)\nabla T\right) \tag{1}$$

Dla wielu technicznie przypadków można przyjąć stałe wartości ρ,c,dla przypadku obszaru kołowo-symetrycznego równanie (1) przyjmuje postać

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}\right) \tag{2}$$

gdzie $r \in (0,R)$, $t > 0$.

Obliczenia wykonano dla dwóch modeli obliczeniowych. W pierwszym z nich uwzględniono stałą wartość współczynnika przewodzenia ciepła λ oraz ciepła właściwego c (model 1, równanie (2)). Drugi model zakładał zmienność współczynnika przewodzenia ciepła λ oraz ciepła właściwego c od temperatury (model 2, równanie (1)). Równanie (2) jest równaniem wyjściowym do rozwiązania zagadnienia odwrotnego z nieznanym warunkiem brzegowym na powierzchni walca

Rozwiązując zagadnienia odwrotne przewodnictwa ciepła w walcu przyjęto warunek początkowy

$$T(r,t=0) = T_0 \tag{3}$$

natomiast warunek brzegowy jako nieznana funkcja czasu był poszukiwany

$$T(r=R,t) = f(t) \tag{4}$$

Podstawą do znalezienia przebiegu temperatury $f(t)$ było wykorzystanie pomiaru temperatury w dwóch punktach wewnątrz walca. Określenie rozkładu temperatury w punktach wewnętrznych walca pozwoliło na wyznaczenie gęstości strumienia ciepła na brzegu zgodnie z prawem Fouriera

$$q = -\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial n} \tag{5}$$

przy uwzględnieniu zmienności właściwości termofizycznych (λ, c) od temperatury dla modelu 1 oraz stałych wartości λ oraz c dla modelu 2. Korzystając z uzyskanej z rozwiązania zagadnienia odwrotnego temperatury na brzegu walca, gęstości strumienia ciepła oraz temperatury gazu obliczono współczynnik przejmowania ciepła zgodnie ze wzorem

$$\alpha = \frac{q}{T_b - T_g} \tag{6}$$

Temperaturę gazu otrzymano z pomiarów w piecu do obróbki cieplno-chemicznej. Model obliczeniowy opisano również w pracach [Joachimiak et al. 2019, Joachimiak i Ciałkowski 2017].

3. STANOWISKO BADAWCZE I ZAŁOŻENIA DO OBLICZEŃ

Nagrzewanie stalowego walca o promieniu R = 50 mm odbywało się od temperatury otoczenia T_0 = 20 °C do temperatury $T_{\max}$ = 550 °C w piecu do obróbki cieplno-chemicznej (rys. 1) w atmosferze azotu. W badaniach przyjęto szybkość nagrzewania 5 °C/min oraz prędkość obrotową wentylatora 1400 obr/min. Pomiary temperatury gazu oraz wewnątrz walca wykonano z użyciem termoelementów typu K. Termoelementy o średnicy 1.5 mm umieszczono na promieniach r_1 = 46 mm oraz r_2 = 48 mm.

Dla modelu 1 przyjęto współczynnik przewodzenia ciepła λ = 44 W/mK oraz ciepło właściwe c = 595 J/kgK. Dla modelu nieliniowego (model 2) przyjęto zależny od temperatury współczynnik przewodzenia ciepła oraz ciepło właściwe, które zapisano jako kombinację liniową jednomianów postaci

$$\lambda(T) = \sum_{i=0}^{n} a_i T^i \tag{7}$$

$$c(T) = \sum_{i=0}^{n} b_i T^i \tag{8}$$

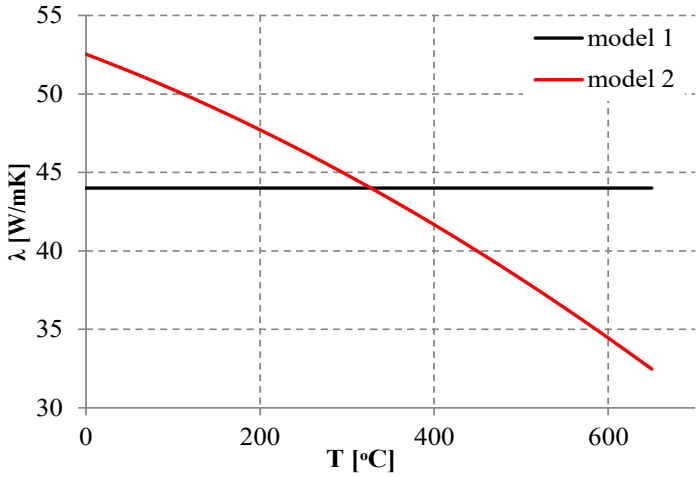
Współczynniki kombinacji liniowej a_i oraz b_i (wzory (7) i (8)) przedstawiono w tabeli 1. Uwzględniona w analizie stal charakteryzuje się znaczącą zmiennością współczynnika przewodzenia ciepła oraz ciepła właściwego. W zakresie temperatury od 20 do 550 °C współczynnik przewodzenia ciepła przyjmuje wartości od 52 do 36 W/mK natomiast ciepło właściwe od 440 do 750 J/kgK [Incropera i De Witt 1996]. Wykresy współczynnika przewodzenia ciepła i ciepła właściwego dla obu modeli obliczeniowych pokazano na rysunkach 2 i 3.

Rys. 1. Piec do obróbki cieplno-chemicznej

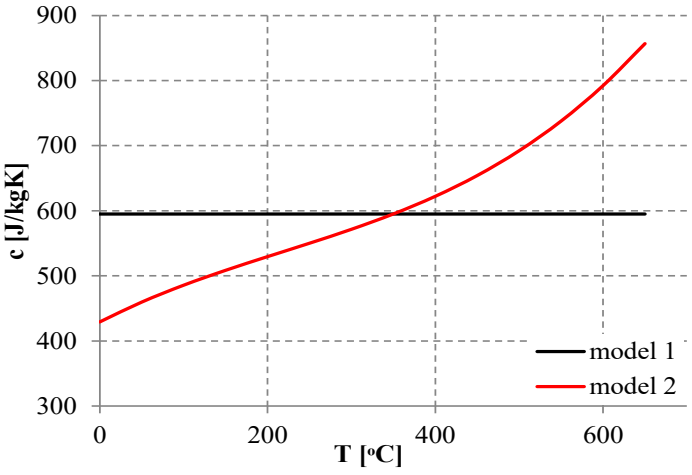
Tabela 1

Współczynniki wielomianów aproksymujących funkcje $\lambda(T)$ i $c(T)$

i	a_i	b_i
0	52.5340989	429.231633
1	$-2.09884113 \cdot 10^{-2}$	$6.62327604 \cdot 10^{-1}$
2	$-1.58493475 \cdot 10^{-5}$	$-1.15820455 \cdot 10^{-3}$
3	$9.84536443 \cdot 10^{-10}$	$1.77072886 \cdot 10^{-6}$



Rys. 2. Współczynnik przewodzenia ciepła stali dla modeli obliczeniowych 1 i 2



Rys. 3. Ciepło właściwe stali dla modeli obliczeniowych 1 i 2

4. WYNIKI OBLICZEŃ

Rozwiązanie zagadnienia odwrotnego pozwoliło na wyznaczenie temperatury na brzegu walca podczas nagrzewania przy założeniu stałej wartości współczynnika przewodzenia ciepła λ oraz ciepła właściwego c (model 1, rys. 4). Uwzględnienie zmienności $\lambda(T)$ oraz $c(T)$ pozwoliło na obliczenie temperatury na brzegu z użyciem

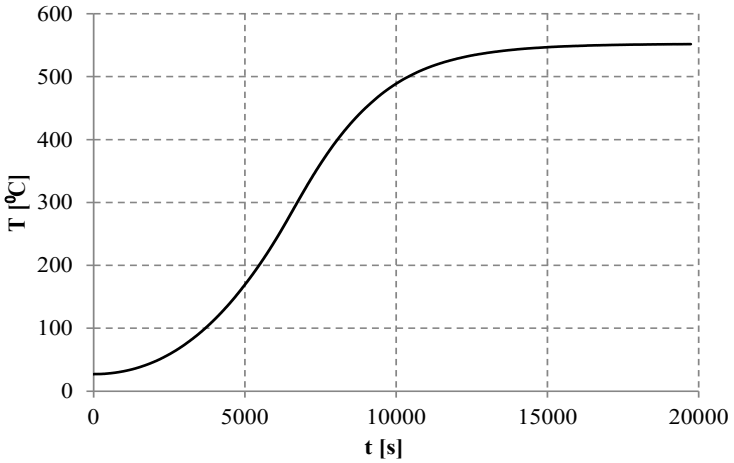
modelu 2 różniącej się od temperatury obliczonej z użyciem modelu 1 o wartości od -0.08 ^{0} C do 0.11 ^{0} C (rys. 5) , co opisano wzorem

$$\Delta T = T_{b1} - T_{b2} \tag{9}$$

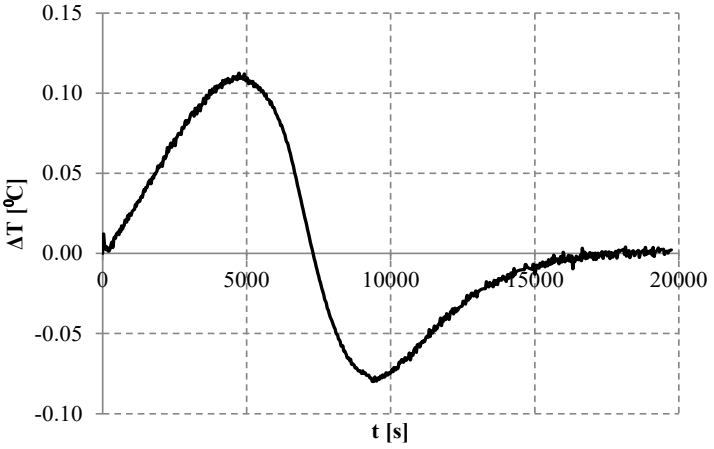
Różnica względna dla temperatury opisana zależnością

$$\delta T = \frac{T_{b1} - T_{b2}}{T_{b2}} \cdot 100\% \tag{10}$$

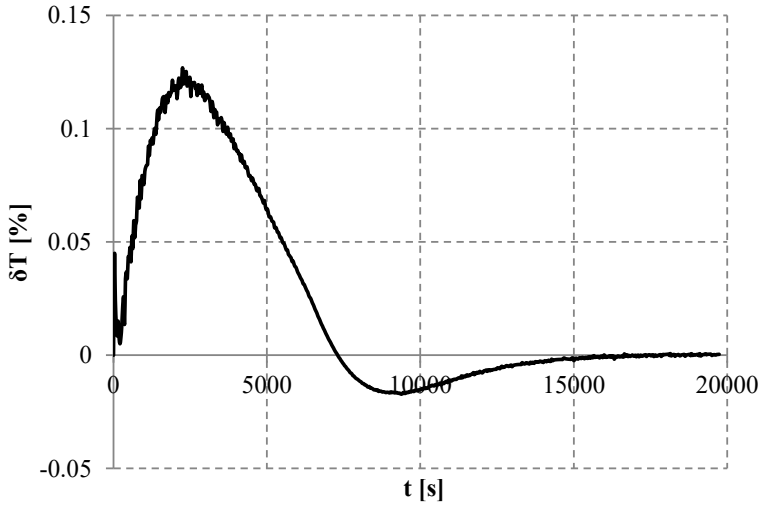
została przedstawiona na rysunku 6. Różnica względna sięga od -0.02 dla czasu t = 9360 s do 0.13 dla czasu t = 2250 s.



Rys. 4. Temperatura na brzegu walca obliczona za pomocą modelu 1

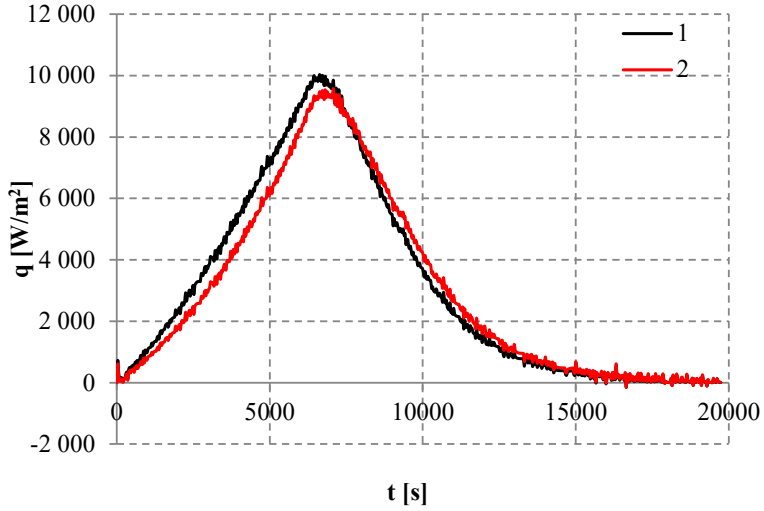


Rys. 5. Różnica pomiędzy temperaturą na brzegu walca obliczoną za pomocą modelu 1 i 2

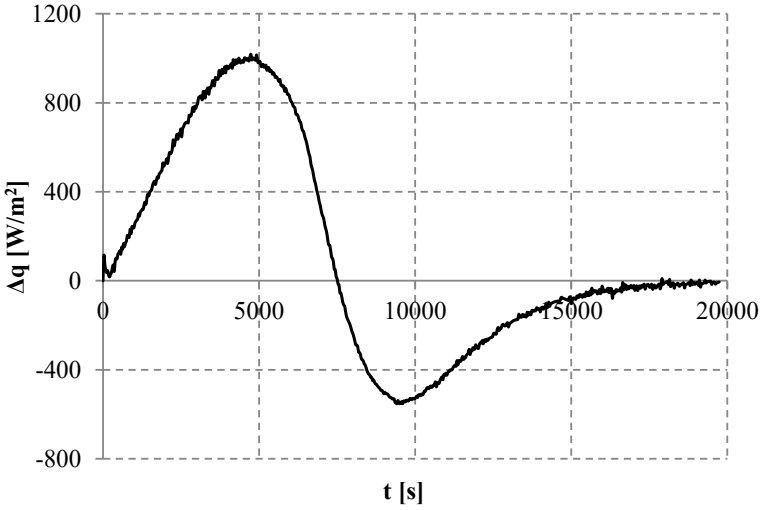


Rys. 6. Różnica pomiędzy temperaturą na brzegu walca obliczoną za pomocą modelu 1 i 2 odniesiona do temperatury na brzegu walca z modelu 2

Wyniki uzyskane z obu modeli obliczeniowych są bardzo zbliżone. Jednak już niewielkie zmiany temperatury wpływają na pozostałe warunki brzegowe. Wartości gęstości strumienia ciepła sięgają blisko 10 000 W/m^2 (t = 6750 s), co pokazano na rys. 7. Wartości te obliczone z użyciem modelu 1 i 2 różnią się w dużo większym stopniu niż wartości temperatury (rys. 7-9).



Rys. 7. Gęstość strumienia ciepła na brzegu walca obliczona za pomocą modelu 1 i 2



Rys. 8. Różnica pomiędzy gęstością strumienia ciepła na brzegu walca obliczoną za pomocą modelu 1 i 2

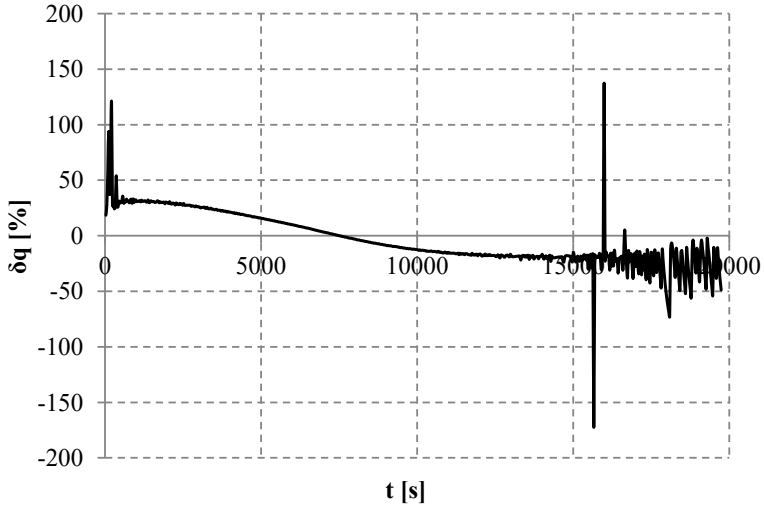
Różnica pomiędzy gęstością strumienia ciepła na brzegu walca obliczoną za pomocą modelu 1 i 2

$$\Delta q = q_{b1} - q_{b2} \tag{11}$$

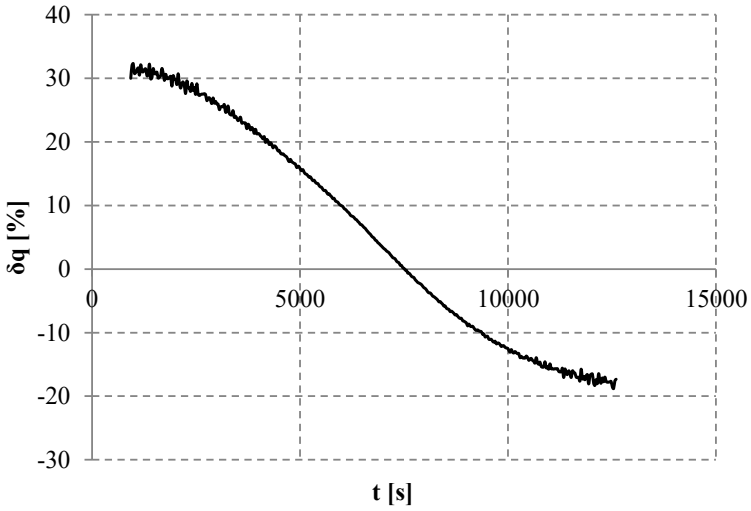
wynosi od -552 W/m^2 do 1017 W/m^2 (rys. 8). Wartości różnicy względnej dla gęstości strumienia ciepła obliczono zgodnie ze wzorem

$$\delta q = \frac{q_{b1} - q_{b2}}{q_{b2}} \cdot 100\% \tag{12}$$

Różnice te są bardzo duże w początkowym i końcowym okresie procesu nagrzewania (rys. 9). Wynika to z tego, że różnica bezwzględna (wzór (11), rys. 8) została odniesiona do małych wartości gęstości strumienia ciepła (rys 7). Po pominięciu początkowych (do t = 930 s) i końcowych (powyżej t = 12 600 s) wartości różnicy względnej dla gęstości strumienia ciepła maleją dla kolejnych jednostek czasu od 32.3 % do -19.4 % (rys. 10).



Rys. 9. Różnica pomiędzy gęstością strumienia ciepła na brzegu walca obliczoną za pomocą modelu 1 i 2 odniesiona do gęstością strumienia ciepła na brzegu walca z modelu 2



Rys. 10. Różnica pomiędzy gęstością strumienia ciepła na brzegu walca obliczoną za pomocą modelu 1 i 2 odniesiona do gęstością strumienia ciepła na brzegu walca z modelu 2 dla czasu od t = 930 s do t = 12600 s

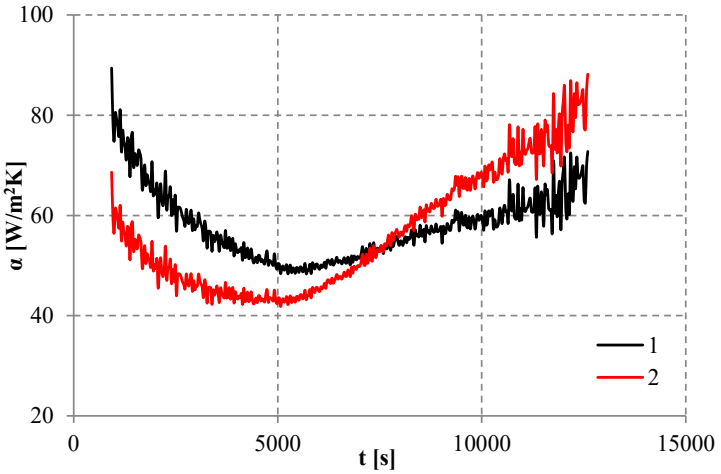
Charakter przebiegu krzywej dla współczynnika przejmowania ciepła w czasie jest zbliżony dla modeli 1 i 2. Do czasu t = 5000 s wartości współczynnika przejmo-

wania ciepła maleją, natomiast w kolejnych jednostkach czasu rosną (rys. 11). Wartości jednak różnią się w sposób znaczący. Różnica bezwzględna dla współczynnika przejmowania ciepła ma postać

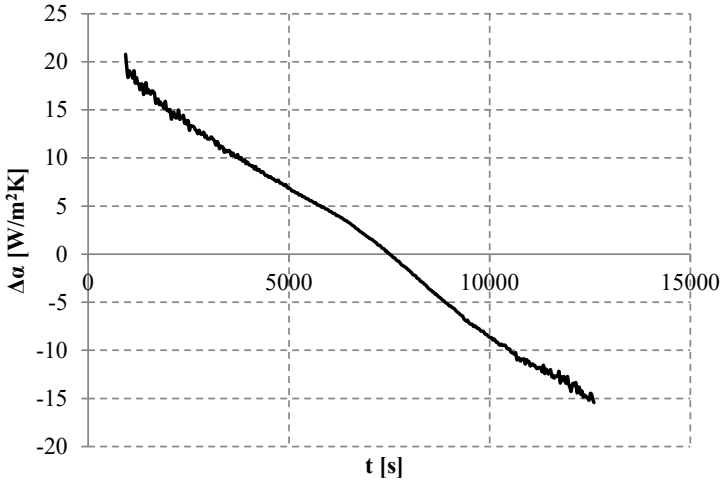
$$\Delta\alpha = \alpha_{b1} - \alpha_{b2} \tag{13}$$

natomiast względna została obliczona zgodnie ze wzorem

$$\delta\alpha = \frac{\alpha_{b1} - \alpha_{b2}}{\alpha_{b2}} \cdot 100\% \tag{14}$$

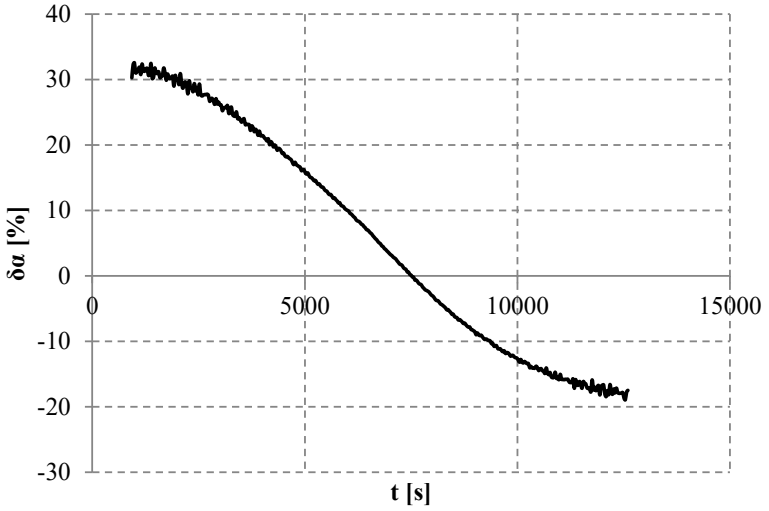


Rys. 11. Współczynnik przejmowania ciepła na brzegu walca obliczony za pomocą modelu 1 i 2 dla czasu od t = 930 s do t = 12600 s



Rys. 12. Różnica pomiędzy współczynnikiem przejmowania ciepła na brzegu walca obliczonym za pomocą modelu 1 i 2 dla czasu od t = 930 s do t = 12600 s

Różnica bezwzględna $\Delta\alpha$ maleje w kolejnych jednostkach czasu od 20.8 W/m^{2}K do -15.4 W/m^{2}K (rys. 12). Różnica względna dla współczynnika przejmowania ciepła na brzegu walca obliczona za pomocą modelu 1 i 2 przyjmuje wartości od -19% do 32.5 % dla czasu od t = 930 s do t = 12600 s.



Rys. 13. Różnica pomiędzy współczynnikiem przejmowania ciepła na brzegu walca obliczonym za pomocą modelu 1 i 2 odniesiona do współczynnika przejmowania ciepła na brzegu walca z modelu 2 dla czasu od t = 930 s do t = 12600 s

5. PODSUMOWANIE

Stosunkowo nieznaczna różnica temperatury na brzegu walca uzyskana z modelu 1 i 2 wpływa znacząco na warunki brzegowe II i III-go rodzaju. Wynika to z faktu, że określenie tych warunków wymaga wyznaczenia pierwszej pochodej temperatury. Względna różnica gęstości strumienia ciepła maleje od wartości 31% (dla czasu $t \approx 1000$ s) do -18% (dla czasu $t \approx 12500$ s). Charakter zmienności oraz wartości δq oraz $\delta\alpha$ są bardzo zbliżone. Na podstawie wyników przedstawionych w pracy można stwierdzić, że aby uzyskać dokładniejsze informacje o warunku brzegowym w postaci gęstości strumienia ciepła oraz współczynnika przejmowania ciepła należy uwzględnić wpływ temperatury na współczynnik przewodzenia ciepła i ciepło właściwe.

LITERATURA

1. Ciałkowski M., Olejnik A., Joachimiak M., Grysa K., Frąckowiak A., 2022, Cauchy type nonlinear inverse problem in a two-layer area, International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, vol. 32, no. 1, pp. 313-331.
2. Frąckowiak A., Spura D., Gampe U., Ciałkowski M., 2019, Determination of heat transfer coefficient in a T-shaped cavity by means of solving the inverse heat conduction problem, International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, vol. 30, no. 4, pp. 1725-1742.
3. Frąckowiak A., von Wolfersdorf J., Ciałkowski M., 2019, Optimization of cooling of gas turbine blades with channels filled with porous material, International Journal of Thermal Sciences, vol. 136, pp. 370-378.
4. Hadamard J., 1902, Sur les problèmes aux dérivéespartielles et leur signification physique, Princeton University Bulletin, pp. 49-52.
5. Joachimiak D., Frąckowiak A., 2020, Experimental and numerical analysis of the gas flow in the axisymmetric radial clearance, Energies, vol. 13, no. 21, article no. 5794 (13 pages).
6. Joachimiak M., 2020, Choice of the regularization parameter for the Cauchy problem for the Laplace equation, International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, vol. 30, no. 10, pp. 4475-4492.
7. Joachimiak M., 2021, Analysis of Thermodynamic Parameter Variability in a Chamber of a Furnace for Thermo-Chemical Treatment, Energies, vol. 14, no.10, 2903-1-2903-18.
8. Joachimiak M., Ciałkowski M., 2014, Optimal choice of integral parameter in a process of solving the inverse problem for heat equation. Archives of Thermodynamics, vol. 35, no. 3, pp. 265-280.
9. Joachimiak M., Ciałkowski M., 2017, Non-linear unsteady inverse boundary problem for heat conduction equation, Archives of Thermodynamics, vol. 38, no. 2, pp. 81-100.
10. Joachimiak M., Ciałkowski M., 2018, Stable solution to nonstationary inverse heat conduction equation, Archives of Thermodynamics, vol. 39, no. 1, pp. 25-37.
11. Joachimiak M., Ciałkowski M., Frąckowiak A., 2020, Stable method for solving the Cauchy problem with the use of Chebyshev polynomials, International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, vol. 30, no. 3, pp. 1441-1456.
12. Joachimiak M., Joachimiak D., Ciałkowski M., Małdziński L., Okoniewicz P., Ostrowska K., 2019, Analysis of the heat transfer for processes of the cylinder heating in the heat-treating furnace on the basis of solving the inverse problem, International Journal of Thermal Sciences, vol. 145, 105985, 1-11.
13. Judt W., 2020, Numerical and Experimental Analysis of Heat Transfer for Solid Fuels Combustion in Fixed Bed Conditions, Energies, vol. 13, no. 22, article no. 6141 (18 pages).
14. Incropera F. P., De Witt D. P., 1996, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons, New York.

15. Mukanova B., 2013, Numerical reconstruction of unknown boundary data in the Cauchy problem for Laplace's equation, Inverse Problems in Science and Engineering, vol. 21, no. 8, pp. 1255-1267.
16. Taler J., 1995, Teoria i praktyka identyfikacji procesów przepływu ciepła, Zakład Narodowy imienia Ossolińskich – Wydawnictwo, Wrocław Warszawa Kraków.
17. Yaparova N., 2014, Numerical methods for solving a boundary-value inverse heat conduction problem, Inverse Problems in Science and Engineering, vol. 22, no. 5, pp. 832-847.

ACKNOWLEDGEMENTS

Źródło finanansowania 0712/SBAD/5202

INFLUENCE OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF STEELS ON THE PRECISE DETERMINATION OF EDGE CONDITIONS DURING HEATING IN A FURNACE FOR THERMOCHEMICAL TREATMENT

Abstract

Thermochemical treatment is characterized by the heating and cooling of machine elements which are included the critical infrastructure over a wide temperature range. Controlling the edge temperature of the heated elements is necessary to produce a surface with high wear resistance, which is related to the reliable working of these elements. The heat conductivity coefficient and the heat specific to steel show a large variation depending on the temperature. This may have a significant impact on the values of the edge conditions (temperature, heat flux density, heat transfer coefficient) obtained by solving the inverse problem for the heat conduction equation. The paper presents a comparison of the results of solving the inverse problem for two computational models. In the first model, a constant, averaged value of the heat conduction and specific heat coefficient was assumed. The second model was taken into account their variability as a function of temperature.

Keywords: thermochemical treatment, inverse problem, variability of thermophysical properties

Damian JOACHIMIAK*
Wojciech JUDT*
Magda JOACHIMIAK*

NUMERYCZNA ANALIZA NAGRZEWANIA MATRYCY DO WYCISKANIA PROFILI ZE STOPÓW ALUMINIUM POD KĄTEM OBRÓBKI CIEPLNO-CHEMICZNEJ

W pracy przedstawiono analizę nagrzewania matrycy do wyciskania profili ze stopów aluminium, która jest elementem masywnym o złożonej geometrii. Wyznaczono przebiegi temperatury maksymalnej i minimalnej w objętości matrycy podczas procesu nagrzewania. Analizowano pole temperatury matrycy dla czasu chrakteryzującego się największą rozbieżnością temperatury w całej objętości elementu. Warunki brzegowe obliczono na podstawie danych eksperymentalnych rozwiązując zagadnienie odwrotne dla równania przewodnictwa ciepła w modelowym elemencie masywnym w kształcie walca. Wspomniane warunki brzegowe przyjęto podczas numerycznej symulacji nagrzewania matrycy w programie Ansys Transient Thermal.

Słowa kluczowe: rozkład temperatury w elemencie masywnym, matryca do wyciskania profili ze stopów aluminium, zagadnienie bezpośrednie i odwrotne dla równania przewodnictwa ciepła

1. WSTĘP

Nagrzewanie elementów o dużej masie i złożonych kształtach podczas procesów obróbki cieplno-chemicznej może generować nierównomierne pola temperatury w tych elementach. Kontrola temperatury powierzchni jest szczególnie trudna dla masywnych elementów o złożonej geometrii. W pracy opisano numeryczną symulację procesu nagrzewania matrycy do wyciskania profili aluminiowych pod kątem obróbki cieplno-chemicznej. Symulację nagrzewania przeprowadzono dla nagrzewania od temperatury otoczenia do temperatury 550°C [Joachimiak et al. 2019]. Analizowana matryca jest elementem masywnym, o nierównomiernej geometrii. Przedstawione

* Instytut Energetyki Cieplnej, Politechnika Poznańska

w pracy badania mają na celu uzyskanie informacji o nierównomierności pól temperatury w objętości matrycy w trakcie nagrzewania. Uwagę skupiono na powierzchniach matrycy które są najbardziej obciążone mechanicznie podczas jej eksploatacji. Jakość powstałej warstwy np. podczas azotowania gazowego jest silnie skorelowana z temperaturą [Joachimiak et al. 2019]. Stąd kontrola pól temperatury wsadu pozwala na uzyskanie warstwy o żądanych właściwościach. W szczególności precyzyjna kontrola warunków brzegowych może być realizowana poprzez rozwiązanie zagadnienia odwrotnego dla równania przewodnictwa ciepła [Joachimiak i Ciałkowski 2017, Joachimiak et al. 2019, Joachimiak 2021].

2. OPIS GEOMETRII I WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁU MATRYCY

Celem przeprowadzonych badań było wyznaczenie rozkładu temperatury matrycy do wyciskania profili ze stopów aluminium (rys. 1) podczas pierwszego etapu obróbki cieplno-chemicznej, jakim jest nagrzewanie. Do właściwości materiałowych, mających kluczowy wpływ na zjawiska przepływu ciepła należą współczynnik przewodzenia ciepła λ oraz ciepło właściwe c. Podczas nagrzewania w piecu do obróbki cieplno-chemicznej występują temperatury od około 20 ^{o}C (temperatura otoczenia) do 550 ^{o}C. Dla wspomnianego powyżej zakresu temperatury zmienność współczynnika przewodzenia ciepła i ciepła właściwego jest znacząca. Stąd analizy przepływu ciepła wykonano przy uwzględnieniu zmieniających się właściwości stali WCLV w funkcji temperatury. Zależność współczynnika przewodzenia ciepła i ciepła właściwego od temperatury przedstawiono w tabelach 1 i 2. Pomiędzy podanymi punktami dokonano interpolacji liniowej. Ze względu na pomijalny wpływ zmian gęstości stali w funkcji temperatury podczas obliczeń założono, że gęstość stali się nie zmienia i wynosi 7850 kg/m3.

Tabela 1

Współczynnik przewodzenia ciepła λ w funkcji temperatury dla stali WCLV

T [^{o}C]	λ [W/(mK)]
20	25,5
350	27,6
700	30,3

Tabela 2

Współczynnik przewodzenia ciepła λ w funkcji temperatury dla stali WCLV

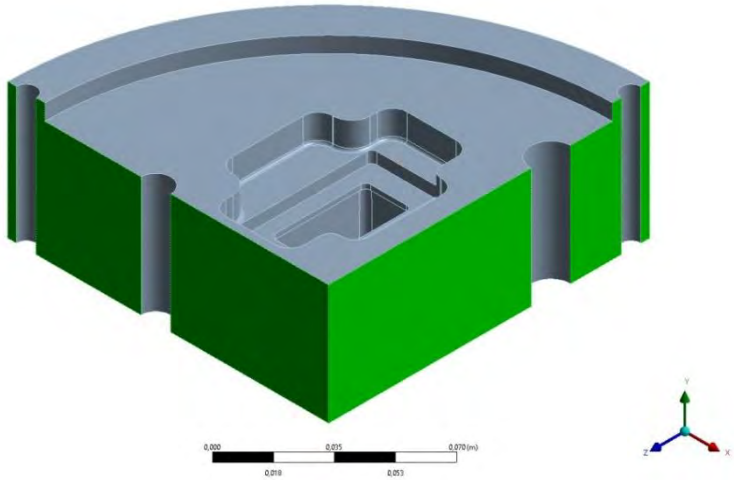
T [°C]	c [J/(kgK)]
0	460
91	521
687	620

Rys. 1. Analizowana geometria matrycy do wyciskania profili ze stopów aluminium [Instytut Maszyn, 2021]

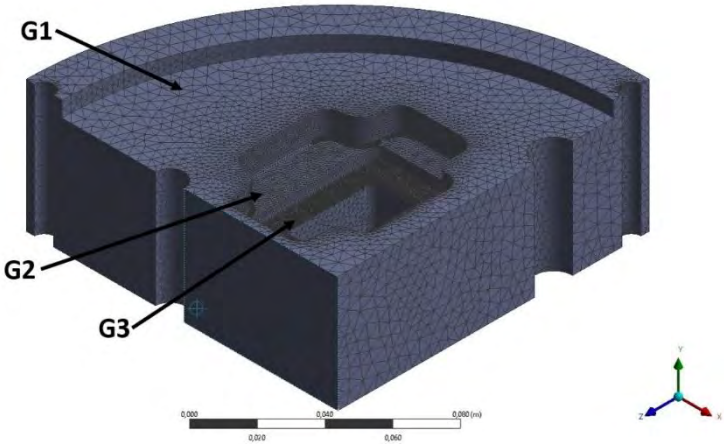
3. SIATKA

Rozkład temperatury wewnątrz matrycy wyznaczono wykorzystując oprogramowanie Ansys Transient Thermal. Obliczenia przeprowadzono dla modelu trójwymiarowego, odwzorowującego rzeczywistą geometrię matrycy. Ze względu na występowanie w matrycy dwóch płaszczyzn symetrii analizie poddano jedną czwartą elementu, przy założeniu warunków symetrii w płaszczyznach przekroju (rys. 2, płaszczyzny zaznaczone na zielono). Siatka zbudowana z około 500 tys. czworościennych elementów została przedstawiona na rysunku 3. Na głównych krawędziach geometrii

zastosowano elementy siatki o trzech różnych wielkościach (G1-G3, rys. 3). Najmniejsze elementy o wielkości 5·10-4 m (G3 rys. 3) wykorzystano do stworzenia siatki dyskretyzującej krawędź matrycy najbardziej obciążonej mechanicznie podczas jej pracy. Kluczowe dla prawidłowej pracy matrycy jest wyznaczenie warunków obróbki cieplno-chemicznej oraz wytworzenie warstwy o wysokich właściwościach mechanicznych dla wspomnianej krawędzi. Większe elementy siatki o wielkości 10-3 m (G2, rys. 3) wykorzystano do przygotowania siatki istotnych elementów, które jednak nie pracują w tak intensywnych warunkach jak wspomniana wcześniej krawędź. Elementy siatki zlokalizowane w innych częściach matrycy charakteryzowały się wielkością siatki wynoszącą 4·10-3 m (G1 rys. 3). Średnia ortogonalność elementów siatki wyniosła 0,75.



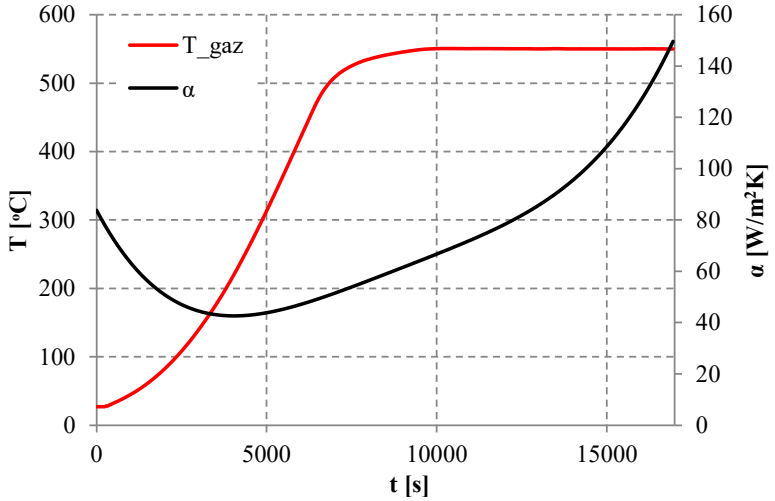
Rys. 2. Fragment matrycy z zaznaczonymi płaszczyznami symetrii



Rys. 3. Fragment matrycy z zaznaczonymi płaszczyznami symetrii

4. WARUNKI POCZĄTKOWE I BRZEGOWE

W programie Ansys Transient Thermal rozwiązano równanie przewodnictwa ciepła we fragmencie matrycy do wyciskania profili ze stopów aluminium. Przyjęta początkowa temperatura matrycy wynosiła 22 ^{0} C. Obliczenia przeprowadzono korzystając z warunku brzegowego trzeciego rodzaju. Przebieg współczynnika przejmowania ciepła oraz temperatury gazu w funkcji czasu wykorzystanych podczas obliczeń przedstawiono na rysunku 4. Przyjęty warunek brzegowy uzyskano na podstawie wcześniejszych badań eksperymentalnych w piecu do obróbki cieplno-chemicznej oraz rozwiązania zagadnienia odwrotnego dla równania przewodzenia ciepła w walcu [Joachimiak et al. 2019]. Dotychczas wykazano nieznaczną zmienność współczynnika przejmowania ciepła w różnych miejscach komory roboczej pieca [Joachimiak 2021]. Stąd wspomniany warunek brzegowy przyjęto dla wszystkich ścian modelu mających kontakt z atmosferą pieca w trakcie obróbki cieplno-chemicznej. Pozostałe płaszczyzny są płaszczyznami symetrii (rys. 2).

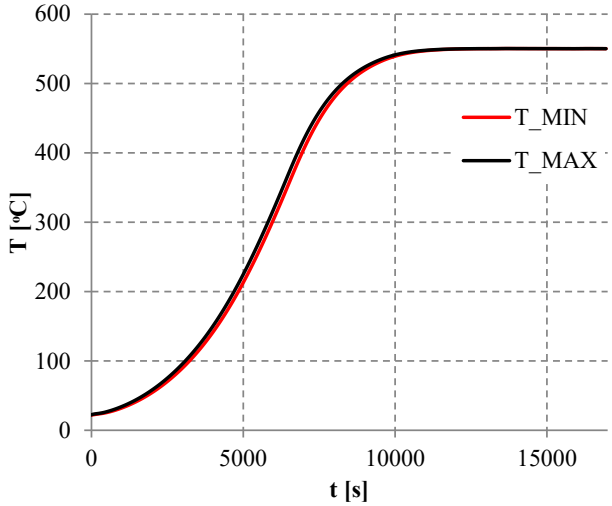


Rys. 4. Temperatura gazu i współczynnik przejmowania ciepła dla procesu nagrzewania w piecu do obróbki cieplno-chemicznej [Joachimiak et al. 2019]

5. OPIS I ANALIZA WYNIKÓW

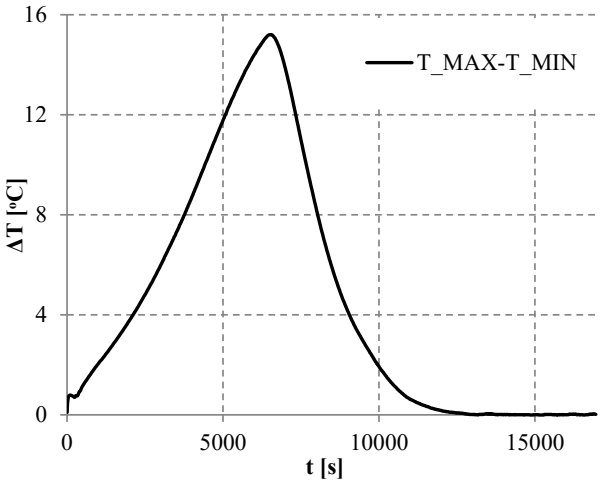
Na podstawie przeprowadzonych symulacji numerycznych wykazano, że matryca w trakcie obróbki cieplno-chemicznej nie nagrzewa się równomiernie. Przebiegi temperatury maksymalnej i minimalnej w objętości analizowanego fragmentu matrycy (rys. 2), jakie występują podczas symulacji nagrzewania przedstawiono na rysunku 5. Wartość temperatury maksymalnej i minimalnej jest odczytywana z programu Ansys

Transient Thermal. Położenie punktów o skrajnych temperaturach jest zmienne w trakcie procesu nagrzewania. Wspomniana różnica temperatury wpływa na naprężenia termiczne oraz równomierność grubości oraz budowę fazową powstającej warstwy wierzchniej. Różnica między temperaturą maksymalną i minimalną rośnie dynamicznie od początku nagrzewania i osiąga do 15.2 ^{0} C dla czasu t = 6540 s dla temperatury gazu wynoszącej 478.4 ^{0} C (rys. 6). W kolejnych jednostkach czasu różnica ta maleje. Po około 10 000 sekund temperatura w matrycy jest już wyrównana (rys. 6) i bliska temperaturze maksymalnej wynoszącej 550 ^{0} C (rys. 5).

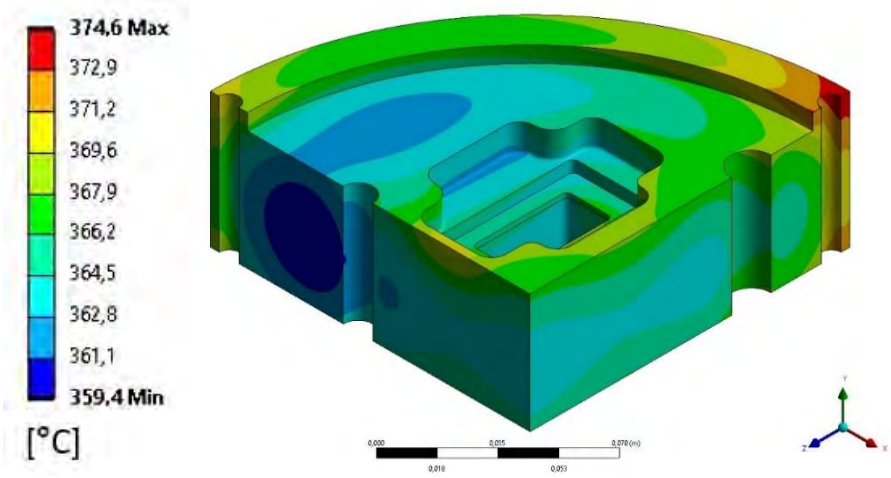


Rys. 5. Przebieg temperatury maksymalnej (T_MAX) i minimalnej (T_MIN) fragmentu matrycy

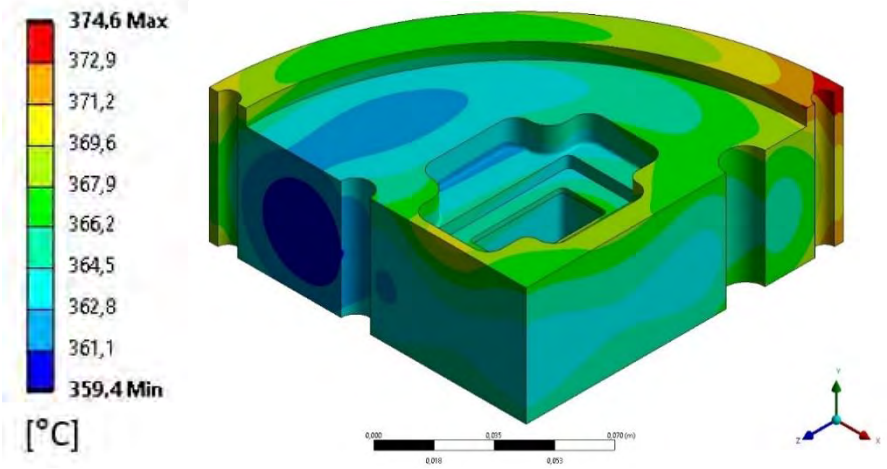
Szczególnie widoczne różnice w rozkładzie temperatury wewnątrz badanego elementu występują dla czasu od 4425 s do 7665 s. Wówczas różnica temperatury maksymalnej i minimalnej w matrycy przekracza 10 ^{0} C. Rozkład temperatury dla czasu t = 6540 s przedstawiono na rysunku 7. Krawędź matrycy eksploatowana w najtrudniejszych warunkach również osiąga wyraźne różnice temperatury podczas nagrzewania, co może wpłynąć na jakość wytworzonej warstwy podczas obróbki cieplno-chemicznej (rys. 8). Różnice temperatury na krawędzi matrycy najbardziej obciążonej mechanicznie dla czasu t=6540 s wynoszą około 5°C.



Rys. 6. Przebieg różnicy temperatury maksymalnej i minimalnej (T_MAX-T_MIN) fragmentu matrycy



Rys. 7. Pole temperatury we fragmencie matrycy dla czasu t = 6540 s



Rys. 8. Pole temperatury krawędzi matrycy najbardziej obciążonej mechanicznie dla czasu t = 6540 s

6. PODSUMOWANIE

Analiza pól temperatury elementów poddawanych obróbce cieplno-chemicznej ma bardzo istotne znaczenie z punktu widzenia jakości obrabianych elementów. Przedstawione w pracy wyniki dowodzą występowania znaczących różnic temperatury na powierzchni i w całej objętości matrycy. Skutkiem występowania wspomnianych różnic temperatury w objętości obrabianego elementu może być przekroczenie dopuszczalnych naprężeń termicznych. Z kolei te mogą prowadzić do odkształceń i pęknięć obrabianego detalu, przez co element może przestać spełniać wymagania jakościowe. Z uzyskanych danych wynika, że maksymalna różnica temperatury w matrycy osiąga nawet 15.2°C. Uzyskiwanie zróżnicowanej temperatury na powierzchni elementu poddanego obróbce cieplno-chemicznej może skutkować wytworzeniem np. warstwy azotowanej o nierównomiernej grubości i nieodpowiedniej jakości. Dla procesów o większej szybkości nagrzewania można spodziewać się większych różnic temperatury zarówno na powierzchni jak i w objętości matrycy.

LITERATURA

1. Joachimiak M., Ciałkowski M., Non-linear unsteady inverse boundary problem for heat conduction equation, Archives of Thermodynamics, 2017, 38(2), pp. 81–100.

2. Joachimiak M., Joachimiak D., Ciałkowski M., Małdziński L., Okoniewicz P., Ostrowska K., Analysis of the heat transfer for processes of the cylinder heating in the heat-treating furnace on the basis of solving the inverse problem, International Journal of Thermal Sciences, 2019, 145, 105985, pp. 1–11.
3. M. Joachimiak, „Analysis of Thermodynamic Parameter Variability in a Chamber of a Furnace for Thermo-Chemical Treatment", Energies, vol. 14, no. 10, 2903, pp. 1-18, 2021. doi.org/10.3390/en14102903.
4. Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych Politechniki Poznańskiej, 2021, Zdjęcie matrycy przeznaczonej do wyciskania profili ze stopów aluminium, Poznań.

ACKNOWLEDGEMENTS

Badania sfinansowano ze środków statutowych Politechniki Poznańskiej, numer projektu 0712/SBAD/5202

NUMERICAL ANALYSIS OF THE DIE HEATING FOR THE EXTRUSION OF ALUMINUM ALLOY PROFILES IN TERMS OF THERMOCHEMICAL TREATMENT

Abstract

The paper presents an analysis of the heating of a die for the extrusion of profiles from aluminium alloys, which is a massive element with a complex geometry. The maximum and minimum temperature distributions in the volume of the die during the heating process were determined. The die temperature field was analysed for the time with the highest temperature divergence in the whole volume of the die. The boundary conditions were calculated on the basis of experimental data by solving the inverse problem for the heat conduction equation in a model solid cylinder-shaped element. These boundary conditions were adopted during numerical simulation of die heating in Ansys Transient Thermal.

Keywords: temperature distribution in a solid component, extrusion die for aluminium alloy profiles, direct and inverse problem for the heat conduction equation

Bożena KARBOWSKA*
Edyta JANEBA-BARTOSZEWICZ**

ZAGROŻENIA WYNIKAJĄCE Z UWALNIANIA TALU, OŁOWIU I KADMU Z NATURALNYCH ORAZ ANTROPOGENICZNYCH ŹRÓDEŁ ZANIECZYSZCZEŃ

Emisja zanieczyszczeń do atmosfery oraz związane z tym osadzanie się metali ciężkich pochodzących ze źródeł antropogenicznych powoduje wzrost stężeń toksycznych metali zwłaszcza na terenach zlokalizowanych w pobliżu obiektów przemysłowych (huty, elektrownie węglowe, cementownie itp.).

Związki na bazie metali ciężkich nie ulegają biodegradacji i wykazują dużą tendencję do akumulacji w środowisku. Nawet ich stopniowe uwalnianie do środowiska związane ze zmniejszoną emisją może prowadzić do poważnego zanieczyszczenia środowiska, a ich przedłużona obecność w systemach lądowych, powietrznych i wodnych może znacznie zwiększyć ryzyko narażenia.

Życie w pobliżu niebezpiecznych składowisk odpadów zawierających metale ciężkie może skutkować przewlekłym narażeniem zdrowia człowieka, dlatego ich stężenie w odpadach przemysłowych, osadach i ściekach powinno być ściśle monitorowane.

Słowa kluczowe: metale ciężkie, toksyczność, emisja, akumulacja.

1. WPROWADZENIE

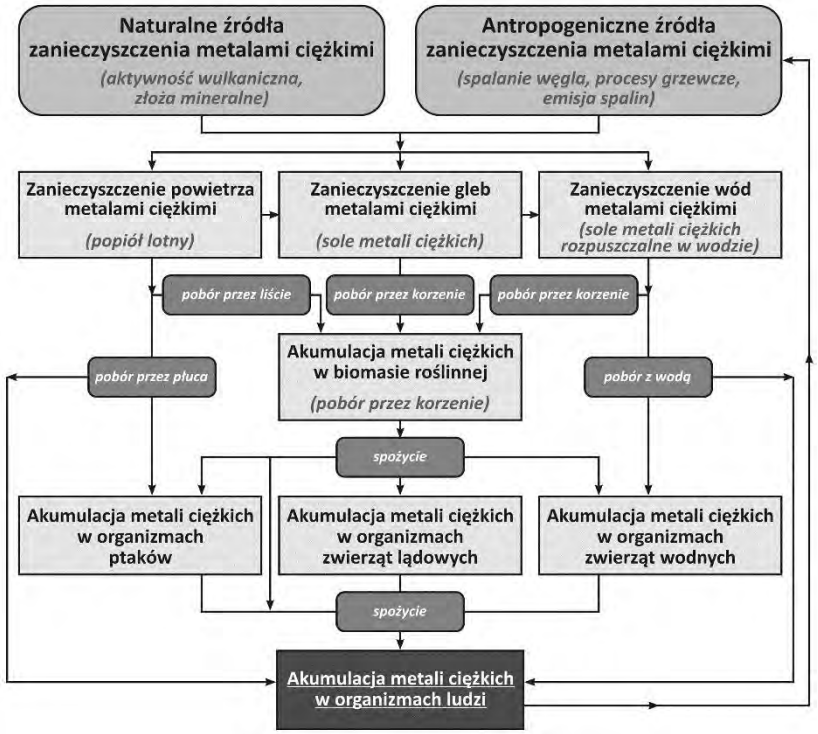
Skażenie metalami ciężkimi jest uważane za poważny problem środowiskowy i stanowi zagrożenie dla zdrowia i życia człowieka.

Środowisko przyrodnicze Polski charakteryzuje się zróżnicowanym stopniem zanieczyszczenia. Głównymi antropogenicznymi czynnikami wpływającymi na właściwości wód i gleb w Polsce są: procesy urbanizacji, działalność górnicza, funkcjonowanie zakładów przemysłowych, transport i komunikacja oraz intensyfikacja uprawy rolnej. Zwiększony poziom emisji może prowadzić do znacznego zanieczyszczenia

* Politechnika Poznańska, Instytut Chemii i Elektrochemii Technicznej
** Politechnika Poznańska, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych

środowiska a w konsekwencji kumulowania się metali w organizmach żywych. Chodzi tu głównie o ołów (Pb), kadm (Cd) oraz tal (Tl) – metale ciężkie, których Polska emituje najwięcej spośród krajów Europejskiego Obszaru Gospodarczego.

Emisje, które prowadzą do wzrostu stężenia metali w środowisku, mogą być naturalne lub związane z działalnością antropogeniczną, co pokazano na Rys. 1.



Rys. 1. Schemat ideowy przedstawiający transport metali ciężkich w środowisku [Karbowska 2016]

Wynikające z tego zanieczyszczenie powietrza (popiół) umożliwia rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń na duże odległości i wnikanie do innych nisz środowiskowych oraz organizmów (wychwyt przez płuca). Według Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) około 80% metali ciężkich dostaje się do organizmu człowieka drogą pokarmową, pozostała część drogą oddechową.

W środowisku lądowym metal jest zwykle związany z matrycą glebową, co znacznie ogranicza jego transport, chociaż formy rozpuszczone metali (sole rozpuszczalne) są podatne na wymywanie i mogą zostać wprowadzone do środowiska wodnego. Takie związki mogą również przedostawać się do podziemnych strumieni wód i zwiększać ryzyko przewlekłego narażenia. Z drugiej strony, wysokie stężenie metali w warstwie powierzchniowej gleby stanowi również znaczne zagrożenie ze

względu na możliwość pobierania przez korzenie roślin i magazynowania w biomasie roślinnej. W rezultacie metal może dostać się do łańcucha pokarmowego i akumulować w żywych organizmach, powodując poważne zaburzenia i ostatecznie prowadząc do śmierci. Wzbogacenie określonych nisz w związki na bazie metali ciężkich jest bezpośrednim wynikiem specyficznego wzorca transportu.

2. RYZYKO SKAŻENIA ŚRODOWISKA METALAMI CIĘŻKIMI

2.1. Tal – toksyczność, emisja oraz stężenie w elementach środowiska

Szybki rozwój technologiczny i przemysłowy spowodował wzrost ryzyka skażenia środowiska metalami ciężkimi takimi jak tal, ołów czy kadm.

Tal – choć mało znany – jest metalem toksycznym dla organizmów ludzkich i zwierzęcych, mikroorganizmów i roślin [Nriagu 1998, Kazantzis 2000, Peter i Viraraghavan 2005]. Toksyczność tego pierwiastka jest wyższa w porównaniu do rtęci, kadmu i ołowiu (maksymalne dopuszczalne stężenie to 0,1 mg/ml) [Repetto i Repetto 1998, Peter i Viraraghavan 2005]. Toksyczność związków na bazie talu spowodowana jest głównie podobieństwem jonu talu (I) do jonu potasu [Groesslova et al. 2015], co skutkuje zaburzeniem procesów metabolicznych inhibujących aktywność kluczowych enzymów m. in.: kinaz, transferaz, hydrolaz, oksydoreduktaz [Sager 1998]. Wrzody żołądka i jelit, łysienie i polineuropatia są uważane za klasyczne zespoły zatrucia talem. Inne objawy to zaburzenia astralne, bezsenność, paraliż, utrata masy ciała, krwawienie wewnętrzne, uszkodzenie mięśnia sercowego, a w konsekwencji śmierć [Galván-Arzate i Santamaria 1998, Kazantzis 2000, Peter i Viraraghavan 2005]. Spożycie więcej niż 1,5 mg talu na 1 kg masy ciała może być śmiertelne. Badania wskazują również, że wysoki poziom Tl może być związany ze zwiększonym ryzykiem niskiej masy urodzeniowej [Xiao et al. 2004].

Emisja ze źródeł przemysłowych powoduje wzrost stężenia talu w pobliżu hut i zakładów spalania węgla [Karbowska 2016]. Szacuje się, że ok. 5000 ton talu jest co roku uwalniane do środowiska w wyniku działalności przemysłowej [Dmowski, Kozakiewicz i Kozakiewicz 2002], z czego ok. 1000 ton pochodzi ze spalania węgla [Querol, Fernandez-Turiel i Lopez-Soler 1995, Galván-Arzate i Santamaria 1998,]. Znaczna ilość talu jest związana z siarczkami (ok. 70%), a pozostała zawartość jest związana z glinokrzemianami i związkami organicznymi [Querol, Fernandez-Turiel i Lopez-Soler 1995]. Produkty spalania węgla – żużel i popiół – zawierają wyższe stężenia talu. Podczas spalania węgla i produkcji cementu tal w wyższej temperaturze ulega utlenieniu, a następnie kondensuje na powierzchni cząstek popiołu, w obszarach o niskiej temperaturze. Wydłużony czas kontaktu popiołu ze spalinami prowadzi do zauważalnego stężenia talu w popiele lotnym, które jest od 2 do 10 razy wyższe w porównaniu ze stanem przed spaleniem [Cvjetko, Cvjetko i Pavlica 2010]. Zawartość

talu w popiele lotnym pochodzącym z polskiej cementowni wahała się od 18 do 40 mg/kg [Kabata-Pendias i Pendias 1999]. Próbki popiołu pobrane z filtrów zainstalowanych w kominach pieców w zakładzie górniczo-hutniczym „Bolesław" zawierały średnio 882 mg/kg talu (popiołu pochodzącego z filtra pieca obrotowego) i do 5% talu w popiele z pieca do spiekania [Kicińska 2009]. Ponadto tal jest emitowany do atmosfery w postaci pyłów, oparów lub cieczy podczas przetwórstwa przemysłowego. Stwierdzenie to jest zgodne z wynikami badań dotyczących zawartości talu w aerozolach w okolicach Katowic, a także ilości talu oznaczonej w popiołach i glebach pochodzących z parków narodowych położonych w południowej Polsce. Zawartość talu w aerozolach ze śródmieścia miasta Katowice wynosiła 66 μg/m^3; jednak wartość ta była znacznie wyższa w sąsiedztwie hut metali [Manecki, Schejbal-Chwastek i Tarkowski 1988]. Należy zauważyć, że ilość talu w powietrzu nie powinna przekroczyć granicy 0,1 mg/m^3. Zawartość talu w wodach rzecznych w Polsce wahała się od 5 do 17 ng/l. Wody morskie zawierają zwykle 10 – 15 ng/l talu [Kabata-Pendias i Pendias 1999, Lis et al. 2003, Małuszyński 2009].

Zawartość talu w próbkach wód podziemnych wynosi zwykle 20 – 24 μg/l; jednak w mioceńskich próbkach wód gruntowych waha się od 13 do 1100 μg/l. Zawartość talu rozpuszczonego z poziomu miocenu pobrane w okolicach Poznania wynosi od 0,005 do 0,47 μg/l. Stężenie talu obecnego w Warcie było na poziomie od 0,15 do 0,47 μg/l. Całkowita zawartość talu w próbkach wód podziemnych wahała się od 0,24 do 26 μg/l. W przypadku zawiesin brunatnych wód podziemnych mediana ilości talu sięgała 40 – 60 μg/g [Łukaszewski et al. 2010].

Naturalna zawartość talu w roślinach wynosi zwykle ok. 0,05 mg/kg [Krasnodębska-Ostręga i Golimowski 2008]. Próbki koniczyny pobrane z nieskażonych rejonów Polski zawierały od 0,008 do 0,01 mg/kg talu, w przypadku traw stężenie wahało się od 0,02 do 0,6 mg/kg, w przypadku warzyw 0,02 – 0,3 mg/kg, natomiast grzyby zawierały do 5,5 mg/kg talu [Kabata-Pendias i Pendias 1999, Kicińska 2009, Małuszyński 2009]. W Polsce największe emisje talu odnotowano w sąsiedztwie kompleksu hutniczo-wydobywczego Zn–Pb w rejonie Bukowno-Olkuskim między miastami Katowice i Kraków. Próbki roślinne (liście) brzozy pochodzącej z tego rejonu zawierały od 9,4 do 12,6 mg/kg talu w pąkach i około. 18,5 mg/kg w liściach. Trawy zawierały średnio 25,5 mg/kg talu. Soki zebrane z pni brzozy zawierały od 89 do 145 μg/l talu. Stwierdzono, że stężenie talu w roślinach kapustnych wzrasta wraz ze spadkiem odczynu gleby [Dmowski, Kozakiewicz i Kozakiewicz 2002].

Tal nie jest uważany za mikroelement, stąd spożywanie pokarmów nawet z jego niską zawartością może wiązać się ze szkodliwą akumulacją tego metalu w narządach wewnętrznych. Należy podkreślić, że tal jest całkowicie wchłaniany z przewodu pokarmowego, a skutki trwałej ekspozycji na niskie stężenia talu nie są do końca poznane. Dla talu brak odpowiednich rozporządzeń, natomiast wg USEPA Environmental Protection Agency – dopuszczalne stężenie talu w wodzie pitnej nie powinno przekraczać 2 μg/l. Niestety brak jest również odpowiednich dyrektyw dotyczących dopuszczalnych granic zawartości talu w żywności, podobnie jak w wytycznych Komisji Europejskiej w odniesieniu do ołowiu i kadmu.

2.2. Ołów – toksyczność, emisja oraz stężenie w elementach środowiska

Jednym z najlepiej zbadanych metali ciężkich, częściowo ze względu na jego dobrze ugruntowany wpływ na zdrowie człowieka, jest ołów. Od dawna jest uznawany za znaczące zanieczyszczenie środowiska a jego toksyczne właściwości znane są od wieków. Metal ten, działa na organizm wielonarządowo. Dostaje się do organizmu przez układ oddechowy lub pokarmowy, jest też wchłaniany w niewielkich ilościach przez skórę. Pierwiastek ten przenika do układu krwionośnego i rozprzestrzenia w narządach wewnętrznych przyczyniając się do zaburzeń funkcjonowania nerek, arytmii serca, powstawania zmian miażdżycowych, kumulując się przy tym w kościach, zębach i paznokciach. Ma działanie mutagenne i kancerogenne. Przy wysokich poziomach ekspozycji ołów atakuje mózg i centralny układ nerwowy, powodując śpiączkę, drgawki, a nawet śmierć. Dzieci, które przeżyją ciężkie zatrucie ołowiem, mogą zostać z niepełnosprawnością intelektualną i zaburzeniami zachowania. Ponadto ekspozycja na Pb objawia się upośledzeniem ruchowym, zaburzeniami płodności. Uważa się, że neurologiczne i behawioralne skutki ołowiu są nieodwracalne [Krzywy et al. 2010].

WHO zidentyfikowała ołów jako jedną z 10 substancji chemicznych stanowiących poważne zagrożenie dla zdrowia i życia.

Obszary najbardziej zanieczyszczone ołowiem – ze względu na obecność kopalń oraz hut – to województwa: śląskie, opolskie oraz małopolskie. WHO przedstawiło wytyczne co do maksymalnej zawartości metali ciężkich w atmosferze, górną dopuszczalną granicą stężenia ołowiu w powietrzu atmosferycznym na obszarach zamieszkanych jest wartość 1μg/l. Głównym źródłem ołowiu uwalnianego do atmosfery jest benzyna oraz czynne wulkany. Podczas spalania paliwa w pojazdach, ołów zawarty w benzynie reaguje ze związkami halogenowymi, tworząc lotne związki, które ulegając kondensacji w postaci aerozolu osiadają na wszystkich elementach środowiska przyrodniczego. Związki ołowiu kumulują się w postaci osadów dennych rzek lub stojących zbiorników wodnych. Warto podkreślić, że od lipca 2021 r. paliwo ołowiowe do samochodów osobowych i ciężarowych nie jest już sprzedawane nigdzie na świecie.

Obecnie woda pitna dostarczana do domów rurociągami zawiera niewielkie ilości ołowiu. Wymagania dotyczące zawartości ołowiu w wodzie przeznaczonej do spożycia reguluje Rozporządzenie Ministra Zdrowia w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi. Według dyrektywy dopuszczalne stężenie ołowiu w wodzie pitnej nie powinno przekraczać: 10 μg/l.

Rozporządzenie Komisji (UE) reguluje najwyższe dopuszczalne poziomy ołowiu w niektórych środkach spożywczych. (Tab. 1).

Tabela 1

Najwyższe dopuszczalne poziomy ołowiu w wybranych produktach żywnościowych wg Rozporządzenia Komisji (UE)

Produkt	Maksymalny poziom w mg/kg świeżej wagi
Warzywa korzeniowe i bulwiaste (z wyłączeniem salsefia, świeży imbir i świeża kurkuma), warzywa cebulowe, warzywa kwitnące kapustne, kapustne głowiaste, kalarepy, warzywa strączkowe, warzywa łodygowe	0,10
Kapustne liściaste, salsefia, grzyby Agaricus bisporus (pospolita pieczarka), Pleurotus ostreatus (boczniak ostrygowaty), Lentinula edodes (grzyb shiitake) i warzywa liściaste (z wyjątkiem świeżych ziół) warzywa liściaste (z wyłączeniem świeżych ziół)	0,30
Dzikie grzyby, świeża kurkuma i świeży imbir	0,80
Kukurydza cukrowa	0,10
Pozostałe warzywa owocowe	0,05
Owoce (z wyjątkiem żurawiny, porzeczki, owoców czarnego bzu i owoców truskawki)	0,10
Żurawina, porzeczka, czarny bez oraz owoce truskawki	0,20
Przyprawy owocowe	0,60
Przyprawy korzeniowe i kłączowe	1,50
Przyprawy z kory	2,00
Przyprawy, słupki kwiatowe	1,00
Przyprawy nasienne	0,90

Prawidłowe stężenie ołowiu w krwi u osób nie narażonych na zatrucie tym metalem, nie przekracza 200 µg/l, natomiast maksymalne dopuszczalne stężenie to 500 µg/l [Gać et al. 2008].

2.3. Kadm – toksyczność, emisja oraz stężenie w elementach środowiska

Kolejnym metalem, silnie toksycznym w odniesieniu do człowieka jest kadm. Metal ten ma działanie genotoksyczne, teratogenne, kancerogenne oraz mutagenne, niekorzystnie wpływa też na układ endokrynny [Skoczyńska et al. 2002]. Kadm jest łatwo wchłaniany i biokumulowany w organizmach żywych. Wpływa na procesy metabolizmu innych pierwiastków w organizmie, takich jak: magnez, cynk, żelazo i miedź. Zastępując cynk w reakcjach biologicznych, zaburza syntezę DNA, RNA

i białek. Narażenie na pyły tlenku kadmu, w stężeniu powyżej 0,5 mg Cd/m^3, powoduje m.in.: rozedmę płuc, niedoczynność nerek, zmiany w układzie kostnym [Piontek et al. 2014].

Do zatrucia tym pierwiastkiem zazwyczaj dochodzi drogą oddechową. Narządy wewnętrzne człowieka, najbardziej narażone na toksyczne działanie związków tego pierwiastka to płuca oraz nerki. Metal ten może uszkodzić też takie narządy jak wątroba, serce oraz mózg. [Karbowska 2016]. Objawami ostrego zatrucia jest niewydolność układu pokarmowego oraz zwłóknienia oraz choroba obturacyjna płuc. Wydalenie tego pierwiastka z organizmu człowieka przebiega w dwóch etapach, z czego pierwszy trwa do 130 dni, a drugi nawet 16 lat [Jakubowski 2012].

Najwyższe skażenie kadmem występuje w pobliżu fabryk zajmujących się obróbką metali nieżelaznych oraz spalaniem węgla, stężenie w atmosferze może wynosić wtedy nawet do 100 ng/m^3 W powietrzu nie przekracza stężenia 5 ng/m^3. Do wody dostaje się przez proces wietrzenia skał. Jego stężenie w słonych wodach szacuje się na 50 ng/l, a w słodkich na poziomie 1µg/l [Jakubowski 2012].

Wymagania dotyczące zawartości kadmu w wodzie przeznaczonej do spożycia reguluje Rozporządzenie Ministra Zdrowia w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi. Według dyrektywy dopuszczalne stężenie kadmu w wodzie pitnej nie powinno przekraczać: 5 µg/l.

Rozporządzenie Komisji (UE) reguluje najwyższe dopuszczalne poziomy kadmu w niektórych środkach spożywczych. (Tab. 2).

Tabela 2

Najwyższe dopuszczalne poziomy kadmu w wybranych produktach żywnościowych wg Rozporządzenia Komisji (UE)

Produkt	Maksymalny poziom w mg/kg świeżej wagi
Orzechy drzewne	0,20
Orzechy sosnowe	0,30
Bakłażany	0,030
Kapustne, inne niż kapustne liściowe	0,040
Brzoskwinie, sadzonki gorczycy i świeże zioła	0,20
Pory	0,040
Białka z nasion roślin strączkowych	0,10
Nasiona rzepaku	0,15
Mak	1,20

3. PODSUMOWANIE

Narażenie ludzi na metale wiąże się głównie ze spożywaniem skażonej żywności lub wody pitnej. Metale ciężkie szybko dostają się do krwiobiegu i są transportowane przez cały organizm, co prowadzi do gromadzenia się w kościach, nerkach i układzie nerwowym. W konsekwencji zaburzone zostaje funkcjonowanie istotnych enzymów regulujących m. in. układ immunologiczny co może powodować mutację genów, choroby autoimmunologiczne oraz nowotworowe (Rys.2). Narażenie na ponadnormatywne stężenia zanieczyszczeń powietrza prowadzi do ogólnego pogorszenia stanu zdrowia, ostrych reakcji układu oddechowego oraz skrócenia długości życia.

Rys. 2. Schemat przedstawiający wpływ metali ciężkich na organizm człowieka [Karbowska et al. 2020]

Należy podkreślić, że stopień toksyczności metali ciężkich zależy w dużej mierze od formy chemicznej w jakiej metal występuje oraz rozpuszczalności w płynach ustrojowych i czasu ekspozycji. Jednoczesna ekspozycja na dwa lub więcej toksycznych metali może mieć skumulowane skutki.

Wzajemne powiązania tych czynników może powodować nasilenie objawów oraz ryzyko negatywnych skutków na zdrowie człowieka.

W dzisiejszych czasach, nawet mimo obecnej wiedzy o zagrożeniach związanych z metalami ciężkimi, częstość występowania zatruć jest znaczna i wymaga profilaktycznych oraz skutecznych działań. Niezbędne są przedsięwzięcia mające na celu ograniczenie emisji, zwłaszcza z procesów spalania w gospodarce komunalnej. Warto podkreślić, że ekspozycja nawet na niskie dawki metalu jest ukrytym zagrożeniem a zanieczyszczenie metalami ciężkimi stanowi problem globalny nie tylko dla środowiska ale dotyczy również setek milionów ludzi na całym świecie. Zanieczyszczenie elementów środowiska metalami ciężkimi posiada charakter trwały (skażenie gleb utrzymuje się przez bardzo długi czas, sięgając niekiedy nawet kilkuset lat).

LITERATURA

Pozycje książkowe

1. Kabata-Pendias A., Pendias H., 1999, Biogeochemia pierwiastków śladowych, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
2. Nriagu J.O., 1998, History, production and uses of thallium. In J.O Nriagu,. (Ed.), Thallium in the Environment 29 (pp. 1-14), Wiley, New York.
3. Repetto G., Repetto M., 1998, Human thallium toxicity. In J.O Nriagu,. (Ed.), Thallium in the Environment 29 (pp.167-199). Wiley, New York.
4. Sager M., 1998. Thallium in agriculture practice In J.O Nriagu,. (Ed.), Thallium in the Environment 29 (pp.59-87), Wiley, New York.

Artykuły w czasopismach

1. Cvjetko P., Cvjetko I., Pavlica M., 2010, Thallium Toxicity in Humans. Archives of Industrial Hygine and Toxicology, 61(1), s. 111-119.
2. Dmowski K., Kozakiewicz A., Kozakiewicz M., 2002, Bioindykacyjne poszukiwania talu na terenach południowej Polski, Kosmos, 51(2), s. 151-163.
3. Gać P., Waliszewska M., Zawadzki M., Poręba R., Andrzejak R., 2008, Neurologiczne skutki zawodowej ekspozycji na ołów, Bezpieczeństwo Pracy 7/8, s. 14-17.
4. Galván-Arzate S., Santamaria A. 1998, Thallium toxicity. Toxicology Letters, 99(1), s. 1-13.
5. Groesslova Z., Vanek A., Mihaljevic M., Ettler V., Hojdovác M., Zádorováa T., et al. 2015. Bioaccumulation of thallium in a neutral soil as affected by solid-phase association, Journal of Geochemical Exploration, 159, s. 208-212.
6. Jakubowski M., 2012, Kadm i jego związki nieorganiczne- w przeliczeniu na Cd, Podstawy i metody oceny środowiska pracy, 72, s. 111-146.
7. Karbowska B., 2016, Presence of thallium in the environment: sources of contaminations, distribution and monitoring methods, Environmental Monitoring and Assessment vol. 2016.
8. Karbowska B., Rębiś T., Zembrzuska, J., Nadolska K., 2020, Thallium in color tattoo inks: risk associated with tattooing, Medycyna Pracy, 71, s. 405-411.
9. Kazantzis G., 2000, Thallium in the environment and health effects. Environmental Geochemistry and Health, 22(4), s. 275-280.
10. Kicińska A., 2009, Arsen i tal w glebach i roślinach rejonu Bukowna, Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych, 40, s. 199-208.

11. Krasnodębska-Ostręga B., Golimowski J., 2008, Zielona gałązka, która truje – Thallus, Analityka: nauka i praktyka, 1, s. 46-50.
12. Krzywy I., Krzywy E., Pastuszak-Gabinowska M., Brodkiewicz A., 2010, Ołów – czy jest się czego obawiać?, Annales Academiae Medicae Stetinensis. Roczniki Pomorskiej Akademii Medycznej w Szczecinie, Szczecin, s. 122-126.
13. Lis J., Pasieczna A., Karbowska B., Zembrzuski W., Lukaszewski Z., 2003, Thallium in Soils and Stream Sediments of a Zn−Pb Mining and Smelting Area, Environmental Science and Technology, 37(20), s. 4569-4572.
14. Łukaszewski Z., Jakubowska M., Zembrzuski W., Karbowska B., Pasieczna A., 2010, Flow-Injection Differential-Pulse Anodic Stripping Voltammetry as a Tool for Thallium Monitoring in the Environment, Electroanalysis, 22(17-18), s. 1963-1966.
15. Małuszyński M., 2009, Thallium in environment, Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych, 40, s. 31-38.
16. Manecki A., Schejbal-Chwastek M., Tarkowski J., 1988, Mineralogical and chemical characteristics of dust air pollutants from areas affected by short- and long-range industrial emissions, Prace Mineralogiczne 78, Kraków.
17. Peter A.L.J., Viraraghavan T., 2005, Thallium: a review of public health and environmental concerns. Environment International, 31(4), s. 493-501.
18. Piontek M., Fedyczak Z., Łuszczyńska K., Lechów H., 2014, Toksyczność miedzi, cynku oraz kadmu, rtęci i ołowiu dla człowieka, kręgowców i organizmów wodnych, Zeszyty Naukowe, Inżynieria Środowiska, Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego, (155), s. 70-83.
19. Querol X., Fernandez-Turiel J.L., Lopez-Soler A., 1995. Trace elements in coal and their behaviour during combustion in a large power station, Fuel, 74 (3), s. 331-343.
20. Skoczyńska A., Poręba R., Sieradzki A., Andrzejak R., Sieradzka U., 2002, Wpływ ołowiu i kadmu na funkcje układu immunologicznego, Medycyna Pracy 53, s. 259- 264.
21. Xiao T., Guha J., Boyle D., Liu C-Q., Zheng B., Wilson G.C., et al. 2004, Naturally occuring thallium: a hidden geoenvironmental health hazard? Environment International, 30(4), s. 501-507.

Rozporządzenia

1. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 7 grudnia 2017 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi (Dz.U. 2017 poz. 2294 z dnia 11 grudnia 2017 r.)
2. Rozporządzenie Komisji (UE) 2021/1317 z dnia 9 sierpnia 2021 r. zmieniające rozporządzenie (WE) nr 1881/2006 w odniesieniu do najwyższych dopuszczalnych poziomów ołowiu w niektórych środkach spożywczych, (Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej L 286/1 z 10.8.2021), https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2021/1317/oj
3. Rozporządzenie Komisji (UE) 2021/1323 z dnia 10 sierpnia 2021 r. zmieniające rozporządzenie (WE) nr 1881/2006 w odniesieniu do najwyższych dopuszczalnych poziomów kadmu w niektórych środkach spożywczych, (Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej L 288/13 z 11.8.2021), https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2021/1323/oj

Komunikaty Internetowe

1. (EPA) Environmental Protection Agency 1983, Atomic absorption, direct aspiration - method. Methods for chemical analysis of water and wastes. Cincinnati: Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, [komunikat internetowy],

https://books.google.pl/books?id=mxN1bxPWdEkC&pg=PA75&lpg=PA75&dq=Environmental+Protection+Agency+1983,+Atomic+absorption,+direct+aspiration+-+method (dostęp 23.05.2022).
2. (WHO) World Health Organization 2011, Cadmium in drinking-water, Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality. Geneva, (WHO/SDE/WSH/03.04/80/Rev/1), [komunikat internetowy], https://cdn.who.int/media/docs/default-source/wash-documents/wash-chemicals/cadmium.pdf?sfvrsn=4dd545bd_4 (dostęp 23.05.2022).
3. (USEPA). United States Environmental Protection Agency Regulation Development for Drinking Water Contaminants 2015, https://www.regulations.gov/document/EPA-HQ-OW-2015-0174-0292), [komunikat internetowy], (dostęp 23.05.2022).
4. Najwyższe dopuszczalne poziomy kadmu i ołowiu, [komunikat internetowy], https://www.agrolab.com/pl/aktualnosci/3552-nowe-najwyzsze-dopuszczalne-poziomy-olowiu-i-kadmu-w-ue.html, (dostęp 23.05.2022).
5. (WHO) World Health Organization 2021, Lead poisoning, https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health [komunikat internetowy], (dostęp 23.05.2022).

ACKNOWLEDGEMENTS

Źródło finansowania: Politechnika Poznańska 0911/SBAD/2204, 0414/SBAD/3622.

THE RISK OF THE RELEASE OF THALLIUM, LEAD AND CADMIUM FROM NATURAL AND ANTHROPOGENIC SOURCES OF POLLUTION

Abstract

The emission of pollutants into the atmosphere and the associated deposition of heavy metals from anthropogenic sources causes an increase in the concentration of toxic metals, especially in areas located in the vicinity of industrial facilities (steel mills, coal-fired power plants, cement plants, etc.).

Compounds based on heavy metals are not biodegradable and show a high tendency to accumulate in the environment. Even their gradual release to the environment associated with reduced emissions can lead to serious environmental pollution and their prolonged presence in land, air and water systems can significantly increase the risk of exposure.

Living near hazardous waste landfills containing heavy metals may result in chronic exposure to human health, therefore their concentration in industrial waste, sludge and sewage should be closely monitored.

Keywords: heavy metals, toxicity, emission, accumulation.

Bożena KARBOWSKA*
Edyta JANEBA-BARTOSZEWICZ**

ZASTOSOWANIE PROCEDUR FRAKCJONOWANIA CHEMICZNEGO DO OCENY RYZYKA ZANIECZYSZCZEŃ ŚRODOWISKA NATURALNEGO METALAMI CIĘŻKIMI

Skażenie środowiska metalami ciężkimi jest aktualnym problemem globalnym i wymaga stałej kontroli i monitorowania. Specjacja metali ciężkich jest jedną z nowoczesnych metod badawczych, pozwalającą na rozróżnienie źródeł emisji oraz umożliwiającą przewidywanie przemian metali oraz migracji w środowisku.

W badaniach środowiskowych w celu oznaczania metali ciężkich stosuje się w tym celu ekstrakcję sekwencyjną, która pozwala rozdzielić metale ciężkie na frakcje chemiczne, które w różnych warunkach naturalnych mogą być uwalniane do roztworu. Mobilne formy metalu (na podstawie rozpuszczalności oraz siły wiązań) dostarczają nam informacji na temat biodostępności oznaczanych metali ciężkich oraz stabilnych i nieaktywnych ich form chemicznych łącznie z oceną stopnia włączania metali ciężkich do obiegu biogeochemicznego. W pracy przedstawiono procedury wykorzystujące najczęściej stosowane schematy ekstrakcji sekwencyjnych, stosowanych do frakcjonowania metali w glebach, osadach i popiołach.

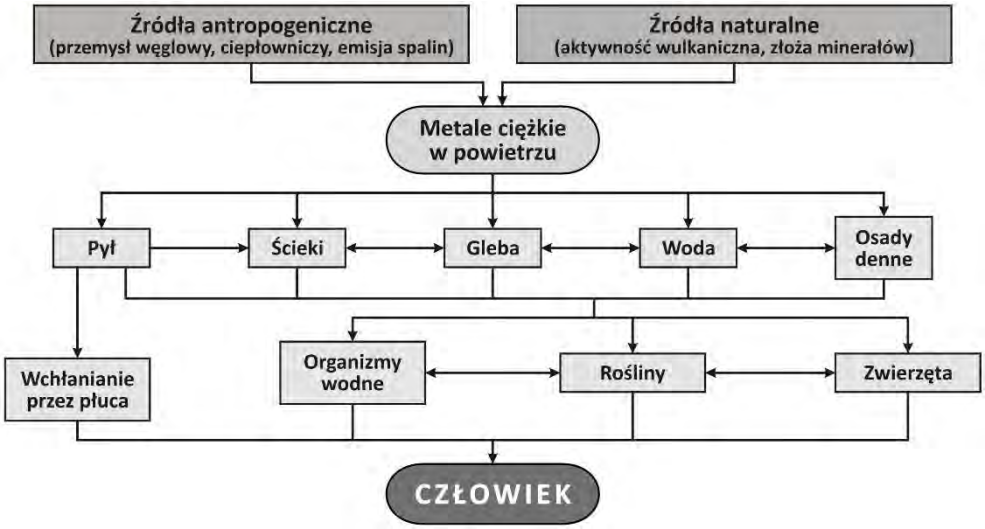
Słowa kluczowe: metale ciężkie, biodostępność, mobilność, ekstrakcja sekwencyjna.

1. WPROWADZENIE

Zanieczyszczenie środowiska metalami ciężkimi jest odzwierciedleniem skażenia powietrza, wody i gleby w wyniku naturalnych (wietrzenie skał, wybuchy wulkanów) oraz antropogenicznych źródeł skażenia takich jak: emisje przemysłowe (pyły z hut, elektrociepłowni, cementowni), ścieki, odpady, produkty spalania węgla (popiół, żużel) (Rys. 1). Problem zanieczyszczenia środowiska metalami ciężkimi był i nadal jest aktualny w Polsce, a ich koncentracja w elementach przyrody jest dość zróżnicowana. Oddziaływanie ich na poszczególne jego komponenty zależy między

* Politechnika Poznańska, Instytut Chemii i Elektrochemii Technicznej
** Politechnika Poznańska, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych

innymi od postaci chemicznej metalu ciężkiego a także pobranej dawki. Ostatecznym biorcą trucizn jest człowiek oddychający powietrzem, pijący wodę i odżywiający się pokarmem pochodzenia roślinnego i zwierzęcego [Kabata-Pendias i Pendias 1999].



Rys. 1. Źródła zanieczyszczeń metalami ciężkimi w środowisku naturalnym oddziałujące na człowieka

Metale ciężkie to pierwiastki o masie właściwej większej od 4,5 g/cm^3, które w reakcjach chemicznych wykazują tendencję do oddawania elektronów, tworząc proste kationy. Metale ciężkie stanowią duże zagrożenie w poszczególnych ogniwach łańcucha pokarmowego ze względu na łatwość przechodzenia przez błony biologiczne, tworzenia połączeń z białkami, kwasami nukleinowymi i tłuszczami, powodując różnego rodzaju uszkodzenia komórek i zaburzenia ich funkcji metabolicznych. Ze względu na stopień zagrożenia metale ciężkie podzielono na następujące grupy [Walker et al. 2002]:

- o bardzo wysokim stopniu potencjalnego zagrożenia, np. Cd, Hg, Pb, Cu, Zn,
- o wysokim stopniu potencjalnego zagrożenia, np. Mo, Mn, Fe,
- o średnim stopniu potencjalnego zagrożenia, np. Ni, Co,
- o niskim stopniu potencjalnego zagrożenia, np. Sr, Zr.

Na skażenie środowiska metalami ciężkimi narażone są głównie te tereny, które położone są w bezpośrednim sąsiedztwie obiektów przemysłowych lub szlaków komunikacyjnych. Metale ciężkie powodują degradację czynnej powierzchni ziemi [Maciak 1999, Wu et al. 2010, Ociepa-Kubicka i Ociepa 2012]. Istotnymi czynnikami są warunki wodno-glebowe, zwłaszcza właściwości fizyczne oraz chemiczne wód i gleb, które w istotny sposób wpływają na mobilność pierwiastków śladowych oraz ich przy-

swajalność przez rośliny, można tu wymienić m. in.: odczyn, zawartość materii organicznej, pojemność sorpcyjną, zawartość makro- i mikroelementów oraz mikroorganizmów. Czynniki te w dużym stopniu decydują o poziomie stężenia metali, które zostaną unieruchomione w zasobach wodnych i glebowych. Właściwości toksyczne ujawniają się podczas kontaktu z przyswajalną formą metalu o stężeniu wywołującym niekorzystną reakcję. Warto podkreślić, że niektóre metale zachowują się względem siebie synergistycznie, zwiększając efekt pobierania a inne antagonistycznie hamując pobieranie jednego metalu przez drugi [Kabata-Pendias i Pendias 1999, Ashworth i Alloway 2004, Fijałkowski et al. 2012].

Bioprzyswajalność oraz szybkość migracji metali ciężkich stanowi ważny aspekt w ocenie stanu środowiska. Do organizmów roślinnych i zwierzęcych mogą przedostawać się tylko biodostępne metale ciężkie. Te z kolei mogą być wbudowane w tkanki i częściowo wydalane wraz z produktami przemiany materii i substancjami organicznymi [Karczewska 2002, Czerniak 2006].

Warto podkreślić, że analiza całkowitej zawartość metali odzwierciedla jedynie stopień zanieczyszczenia środowiska, nie jest natomiast wystarczająca do oceny wpływu zanieczyszczenia na środowisko naturalne [Campanella et al. 1995] i nie powinna być wykorzystywana jako wskaźnik potencjalnego zagrożenia.

Zgodnie z definicją Międzynarodowej Unii Chemii Czystej i Stosowanej (IUPAC) frakcjonowanie polega na stopniowym wydzieleniu oznaczanego pierwiastka w różnych formach poprzez działanie specyficznym ekstrahentem o wzrastającej sile elucyjnej. Może być ono przeprowadzone na drodze ekstrakcji jednoetapowych lub wieloetapowych [Templeton et al. 2000].

Procedura ekstrakcji sekwencyjnej gleby wyłania dużo więcej informacji o badanych metalach niż dane uzyskane z pomiarów ich całkowitego stężenia, ponadto umożliwia symulowanie warunków środowiskowych, zarówno naturalnych, jak i zmienionych antropogenicznie [Żyrnicki i Smeda 2002]. Podział metali śladowych na odpowiednie frakcje pozwala określić ich wpływ na środowisko: mobilność [Rauret et al. 1988], przyswajalność biologiczną [Szefer et al. 1995] oraz toksyczność [Borovec 1996, Mocek et al. 2012].

Obecnie nie ma ujednoliconych metod określania biodostępności metali ciężkich w elementach środowiska naturalnego. Ogólnie jony metali w glebach (osadach dennych, osadach ściekowych, popiołach lotnych itp.) mogą być: związane w trwałych minerałach pierwotnych, związane z siarczkami lub materią organiczną, połączone z tlenkami lub wodorotlenkami żelaza, manganu i glinu, związane w węglanach, zaadsorbowane lub jonowymienne, skompleksowane w ekstraktach glebowych lub wolne [Kabata-Pendias i Pendias 1999, Shiowatana et al. 2001, Mossop i Davidson 2003]. Oprócz wolnych jonów metali, jonów skompleksowanych także zaadsorbowane i jonowymienne należy uważać za mobilne formy metali. Dodatkowo metale związane w węglanach również mogą być mobilne, jeżeli gleba zostanie zakwaszona w sposób naturalny lub w wyniku działań antropogenicznych. W wyniku zmian różnych czynników atmosferycznych oraz właściwości gleby (osadu) może dojść do zwiększenia poziomu wymywania zanieczyszczeń.[Karbowska 2004].

2. PROCEDURY STOSOWANYCH EKSTRAKCJI SEKWENCYJNYCH

Istnieje wiele procedur ekstrakcji sekwencyjnych przedstawionych w literaturze. Oparte są one na różnych schematach oraz wykonywane są w odmiennych warunkach [Usero et al. 1998, Sytherland i Tack 2003, Beni et al. 2004]. Uruchomienie metali zależy od rodzaju wykorzystanego eluentu. Na stopień wymywania metali wpływa stężenie stosowanego odczynnika, temperatura oraz czas ekstrakcji. Zwykle frakcja wolnego metalu wymywana jest wodą dejonizowaną. Frakcja jonowymienna i zaadsorbowana metalu jest ekstrahowana octanem amonu, azotanem amonu lub chlorkiem magnezu. Jony metali związanych z węglanami są traktowane buforem octanowym (pH 5) lub rozcieńczonym HCl, ewentualnie CH_3COOH (pH 3 – 3,5). Silnie związany metal jest wymywany roztworami zawierającymi mocny reduktor (chlorowodorek hydroksyloaminy lub szczawiany) a następnie traktowany mocnym utleniaczem (30 % nadtlenkiem wodoru lub chloranem(V)) [Rule 1998, Rauret et al. 1988]. Najbardziej popularne procedury ekstrakcyjne wykorzystują procedurę opracowaną przez Tessier'a [1979], (Tab. 1), która umożliwia oznaczanie pięciu frakcji: jonowymiennej, węglanowej, redukowalnej (tlenkowej), organicznej oraz pozostałości oraz procedurę opracowaną przez Kersten'a i Förstner'a [1986], która umożliwia oznaczanie form metali powiązanych ze związkami łatwo oraz umiarkowanie redukowalnymi.

Tabela 1

Schemat ekstrakcji sekwencyjnej opracowany przez Tessier'a.

Frakcja		Środki ekstrakcyjne; pH	Warunki ekstrakcji	
			Czas wytrząsania	Temperatura [°C]
1	Jonowymienna	1 M $MgCl_2$; pH 7	1 h	25
2	Węglanowa	1 M CH_3COONa + (CH_3COOH); pH 5	5 h	25
3	Redukowalna	0,04 M $NH_2OH \cdot HCl$ w 25% CH_3COOH	6 h	96
4	Organiczna	0,02 M HNO_3 + 30% H_2O_2 + (HNO_3); pH 2	2 h	85
		30% H_2O_2 + (HNO_3); pH 2	3 h	85
		3,2 M CH_3COONH_4/20% HNO_3	0,5 h	25
5	Pozostałość	HF na gorąco + $HClO_4$ stężony		

Metoda Tessiera – przez lata doskonalona – ulegała licznym modyfikacjom. Kersten i Förstner wprowadzili etap uwalniania metali ciężkich ekstrahowalnych 1 M CH_3COONH_4 zamiast 1 M $MgCl_2$.(Tab. 2).

Tabela 2

Schemat ekstrakcji sekwencyjnej opracowany przez Kersten'a i Förstner'a.

Frakcja		Środki ekstrakcyjne; pH	Warunki ekstrakcji	
			Czas wytrząsania	Temperatura [°C]
1	Jonowymienna	1 M CH_3COONH_4; pH 7	2 h	25
2	Węglanowa	1 M CH_3COONa + (CH_3COOH); pH 5	5 h	25
3	Łatwo redukowalna	0,1 M $NH_2OH \cdot HCl$ w 0,01 M HNO_3	12 h	25
4	Umiarkowanie redukowalna	0,1 M bufor szczawianowy; pH 3	24 h w ciemni	25
5	Organiczna	30% H_2O_2 + (HNO_3); pH 2	2 h; odparowanie	85
		1 M CH_3COONH_4 w 6% HNO_3	12 h	25
6	Pozostałość	Stężony HNO_3 - na gorąco		

Kersten i Förstner [1986] zaproponowali oznaczanie frakcji umiarkowanie redukowalnej – amorficznych tlenków Fe(III) obok frakcji łatwo redukowalnej – tlenków Mn(III/IV). Procedura ta umożliwia oznaczanie sześciu frakcji: jonowymiennej (1 M CH_3COONH_4, pH 7); węglanowej (1 M CH_3COONa/CH_3COOH, pH 5); tlenkowej – łatwo redukowalnej (0,1 M $NH_2OH \cdot HCl$/0,01 M HNO_3); tlenkowej – umiarkowanie redukowalnej (0,1 M bufor szczawianowy, pH 3); organicznej i siarczkowej (30% H_2O_2, pH 2 (HNO_3), a następnie 1 M CH_3COONH_4 w 6% HNO_3) oraz pozostałej (stężony HNO_3).

W celu ujednolicenia metodologii i porównania wyników z różnych laboratoriów, opracowano schemat BCR – European Community's Bureau of References [2001] (Tab. 3). Ma on szerokie zastosowanie w analizie ekstrakcji sekwencyjnej gleb, osadów morskich, osadów rzecznych oraz osadów z oczyszczalni ścieków [Karbowska 2004].

Tabela 3

Schemat ekstrakcji sekwencyjnej BCR.

Frakcja		Środki ekstrakcyjne; pH	Warunki ekstrakcji	
			Czas wytrząsania	Temperatura [°C]
1	Rozpuszczalna w kwasie	1 M CH_3COONH_4; pH 7	16 h	25
2	Redukowalna	0,1 M $NH_2OH \cdot HCl$ + (HNO_3); pH 2	16 h	25
3	Utlenialna	30% H_2O_2 + (HNO_3); pH 2	5 h	85
		1 M CH_3COONH_4 + (HNO_3); pH 2	16 h	25
4	Pozostałość	Stężony HNO_3 - na gorąco		

Schemat ekstrakcji BCR zmodyfikował Rauret poprzez wprowadzenie przed pierwszym etapem procedury – wymywanie wodą dejonizowaną [Rauret et al. 1988,

Rauret 1998]. Rozwinięcie tej ekstrakcji o frakcję wodną jest wskazane, gdyż rodzaj rozpuszczalnej frakcji wodnej dostarcza bardzo ważnych informacji niezbędnych do oceny ryzyka zanieczyszczenia środowiska ze wskazaniem najbardziej mobilnej formy metalu (Tab. 4).

Tabela 4

Zmodyfikowany przez Rauret'a schemat ekstrakcji sekwencyjnej BCR

Frakcja		Środki ekstrakcyjne; pH	Warunki ekstrakcji	
			Czas wytrząsania	Temperatura [°C]
1	Wodna	Woda dejonizowana	16 h	25
2	Węglanowa	0,11 M CH_3COOH	16 h	25
3	Utlenialna	$NH_2OH{\cdot}HCl$ + (HNO_3); pH 2	16 h	25
4	Pozostałość	30% H_2O_2	1 h	25
			1 h; odparowanie	85
		30% H_2O_2	1 h; odparowanie	85
		CH_3COONH_4 + (HNO_3); pH 2	16 h	25

Podany schemat czterostopniowej ekstrakcji nie uwzględnia metalu uwalnianego na zasadzie wymiany jonowej (z zastosowaniem azotanu amonu) i metalu związanego ze związkami umiarkowanie poddającymi się redukcji (z odczynnikiem $NH_2OH{\cdot}HCl$ w 25% CH_3COOH), a także uwalnianego w procesie kwaśnej ekstrakcji (z użyciem HNO_3 i H_2O_2). Bardziej rozbudowany schemat sekwencyjnej ekstrakcji proponuje J. H. Rule [1998] (Tab. 5).

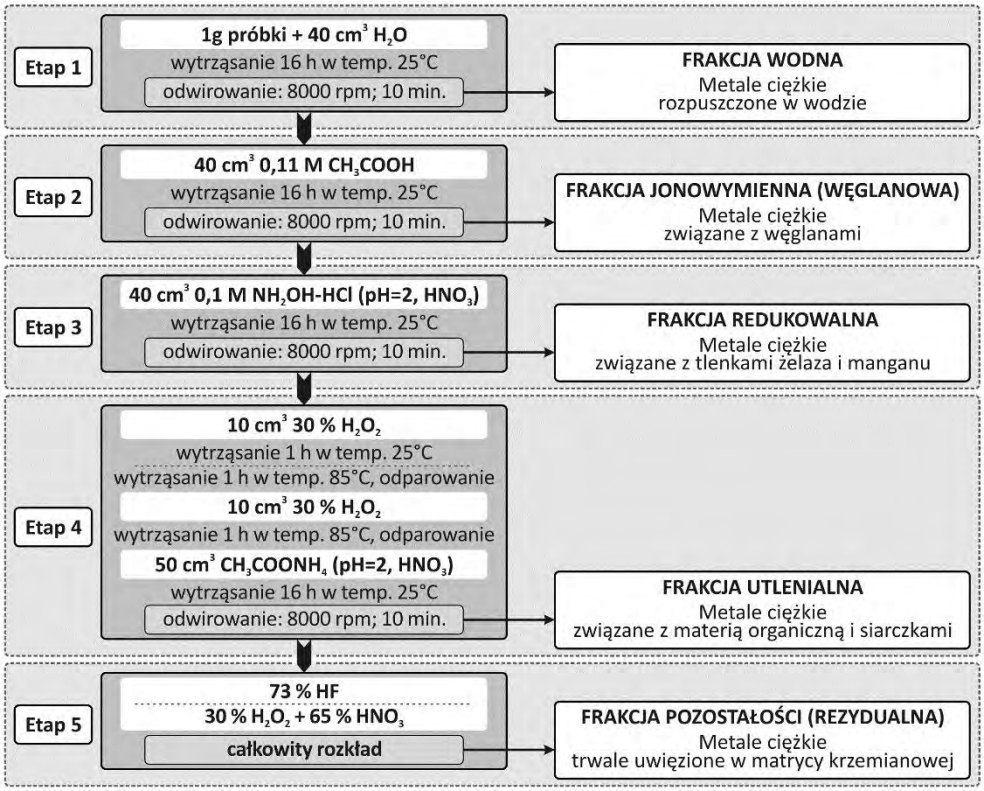
Tabela 5

Schemat ekstrakcji sekwencyjnej opracowany przez Rule'a.

Frakcja		Środki ekstrakcyjne; pH	Warunki ekstrakcji	
			Czas wytrząsania	Temperatura [°C]
1	Wodna	Woda dejonizowana	1 h	25
2	Jonowymienna	NH_4NO_3	1 h	25
3	Węglanowa	1 M bufor octanowy; pH 5	5 h	25
4	Łatwo redukowalna	0,1 M $NH_2OH{\cdot}HCl$ w 0,01 M HNO_3	1 h	25
5	Umiarkowanie redukowalna	0,04 M $NH_2OH{\cdot}HCl$ w 25% CH_3COOH	6 h	96
6	Organiczna i siarczkowa	0,02 M HNO_3 + 30% H_2O_2; pH 2	5 h	85
		4 M CH_3COONa w 20% HNO_3	0,5 h	25
7	Pozostałość	Stężony HNO_3 + 30% H_2O_2		

W celu ujednolicenia metodologii oraz porównania wyników pochodzących z różnych laboratoriów, opracowano schemat BCR – European Community Bureau

of Reference. Ma on szerokie zastosowanie w analizie ekstrakcji sekwencyjnej zarówno gleb, osadów rzecznych, jak i osadów z oczyszczalni ścieków [Vanek et al. 2010]. W celu poszerzenia informacji na temat mobilności metalu rozbudowano procedurę o dwa etapy: etap wstępny – ekstrakcja wodą (do oznaczenia rozpuszczalnych w wodzie, najbardziej mobilnych form, stwarzającego największe zagrożenie dla środowiska) oraz etap końcowy – całkowita mineralizacja próbki po czterech etapach ekstrakcji w celu oznaczenia metalu trwale związanego z matrycą krzemianową [Karbowska 2004]. W kontekście potencjalnych zagrożeń związanych z obecnością różnych związków w środowisku, kwestią kluczową jest biodostępność metalu w próbkach różnego pochodzenia. Ekstrakcje sekwencyjne powszechnie stosowane w badaniach środowiskowych stanowią istotne narzędzie do określenia rozpuszczalnych, przyswajalnych, biodostępnych form metalu. Frakcje pierwiastka rozpuszczalne w wodzie oraz związane wymiennie są szczególnie uznawane za potencjalnie biodostępne dla organizmów (Rys. 2).



Rys. 2. Rozbudowany schemat ekstrakcji sekwencyjnej BCR

3. PODSUMOWANIE

W Polsce normowane są jedynie całkowite zawartości metali w glebach/osadach, udział frakcji mobilnych jest pomijany. Badania oparte na procedurach ekstrakcji sekwencyjnej pozwalają wyodrębnić poszczególne formy oraz frakcje metalu, które składając się na całkowitą zawartość danego pierwiastka oraz oceniają jego potencjalną mobilność w środowisku naturalnym. Najbardziej mobilne formy metalu (po ekstrakcji wodnej) wskazują na możliwość łatwego w większości przypadków pobierania pierwiastka przez organizmy żywe oraz ich sukcesywnego kumulowania. W tym przypadku prosta jest też migracja zanieczyszczeń w głąb profilu glebowego do poziomu wód gruntowych.

Warto podkreślić, że rekultywacja gleb skażonych metalami ciężkimi jest bardzo droga i stosowana na niewielką skalę. W ostatnich latach obiecujące wyniki dały badania nad tak zwaną fitoremediacją, która polega na zastosowaniu w skażonym środowisku roślin zdolnych do wzrostu i oddziaływania na zachodzące w nim: biologiczne, chemiczne oraz fizyczne procesy, by w efekcie przyczynić się do usunięcia tych zanieczyszczeń z terenu [Meagher 2000]. Po zakończeniu okresu wegetacyjnego, rośliny te zbiera się z oczyszczonej powierzchni, a następnie poddaje się procesom termicznym, fizycznym, chemicznym lub mikrobiologicznym. Zaletą technologii fitoremediacyjnych są, między innymi, niskie koszty i łatwość zastosowania, a wadą – długi czas trwania procesu oraz nie w pełni opracowana technologia utylizacji biomasy. Bardzo ważne jest poszukiwanie nowych rozwiązań oczyszczania zagrożonych ekosystemów bo przekroczenie dopuszczalnego poziomu skażenia środowiska metalami ciężkimi może mieć poważne konsekwencje zarówno dla zdrowia ludzi jak i zwierząt.

LITERATURA

Pozycje książkowe

1. Kabata-Pendias A., Pendias H., 1999, Biogeochemia pierwiastków śladowych, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
2. Maciak F., 1999, Ochrona i rekultywacja środowiska, Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
3. Rule J. H., 1998, Adsorption and it's Applications in Industry and Environmental Protection Studies in Surface Science and Catalysis, Elsevier Science B. V. Vol.120 (Ed: A. Dąbrowski), Elsevier, New York.
4. Walker C.H., Hopkin S.P., Sibly R.M., Peakall D.B., 2002, Podstawy ekotoksykologii, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.

Artykuły w czasopismach

1. Ashworth D.J., Alloway B.J., 2004, Soil mobility of sewage sludge-derived dissolved organic matter, copper, nickel and zinc, Environmental Pollution, 127, s. 137-144.

2. Beni V., Newton H., Arrigan D., Hill M., Lane W., Mathewson A., 2004, Voltammetric Behavior at Gold Electrodes Immersal in the BCR Sequential Extraction Scheme Media. Application of Underpotential Deposition – Stripping Voltammetry to Determination of Copper in Soil Extracts, Analytica Chimica Acta, 502, s. 195-206.
3. Borovec Z., 1996, Evaluation of the Concentrations of Trace Elements in Stream Sediments by Factor and Cluster Analysis and the Sequential Extraction Procedure, Science of the Total Environment. 177, s. 237-250.
4. Campanella L., D'Orazio D., Petronio B. M., Petrantonio E., 1995, Proposal for a Metal Speciation Study in Sediments, Analitica Chimica Acta, 309, s. 387-292.
5. Czerniak A., 2006, Formy występowania chromu w zasięgu oddziaływania leśnych dróg cementowo – gruntowych, Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, 3(1), s. 17-30.
6. Fijałkowski K., Kacprzak M., Grobelak A., Placek A., 2012, The influence of selected soil parameters on the mobility of heavy metals in soil, Inżynieria i Ochrona Środowiska, 15, s. 81-92.
7. Karbowska B., 2004, praca doktorska, Woltamperometryczne oznaczanie talu w roztworach otrzymanych po sekwencyjnej ekstrakcji gleby, Politechnika Poznańska.
8. Karczewska A., 2002, Metale ciężkie w glebach zanieczyszczonych emisjami hut miedzi – formy i rozpuszczalność. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu, Rozprawy, 184, s. 1-159.
9. Kersten M., Förstner U., 1986, Chemical fractionation of heavy metals in anoxic estuarine and coastal sediments, Water Science and Technology, 18, s. 121-130.
10. Meagher R., 2000, Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants, Current Opinion in Plant Biology, 3, s. 153-162.
11. Mocek A., Spychalski W., Dobek A., Mocek-Płóciniak A., 2012, Comparison of three methods of copper speciation in chemically contaminated soils, Polish Journal of Environmental Studies, 21(1), s. 159-164.
12. Mossop K., Davidson Ch., 2003, Comparison of Original and Modified BCR Sequential Extraction Procedures for the Fractionation of Copper, Iron, Lead, Manganese and Zinc in Soils and Sediments, Analytica Chimica Acta, 478, s. 111-118.
13. Ociepa-Kubicka., A. Ociepa., E., 2012, Toksyczne oddziaływanie metali ciężkich na rośliny, zwierzęta i ludzi, Inżynieria i Ochrona Środowiska, 15 (2), s. 169-180.
14. Rauret G., Rubio R., Lopez-Sanchez J. F., Casassas E., 1988, Determination and Speciation of Copper and Lead in Sediments of a Mediterranean River, Water Research,. 22, s. 449-455.
15. Rauret G., 1998, Extraction procedures for the determination of heavy metals in contaminated soil and sediment, Talanta, 46, 449-453.
16. Shiowatana J., Tantidanai N., Nookabkaew S., Nacapricha D., 2001, A Flow System for the Determination of Metal Speciation in Soil by Sequential Extraction, Environmental International, 26, s. 381-387.
17. Sytherland R., Tack M G., 2003, Fractionation of Cu, Pb and Zn in Certified Reference Soils SRM 2710 and SRM 2711 Using the Optimizied BCR Sequential Extraction Procedure, Advances in Environmental Research, 8, s. 37-50.
18. Szefer P., Glasby G., Penpokowiak J., Kaliszan R., 1995, Extraction Studies of Heavy metal Pollutants in Surficial Sediments from Southern Balic Sea of Poland, Chemical Geology, 120, s. 111-126.

19. Templeton D.M., Ariese F., Cornelis R., Danielsson L.-G., Muntau H., Van Leeuwen H.P., Łobiński R., 2000, Guidelines for terms related to chemical speciation and fractionation of elements. Definitions, structural aspects, and methodological approaches (IUPAC recommendations 2000), Pure and Applied Chemistry, 72 (8), s. 1453-1470.
20. Tessier A., Campbell P., Bisson M., 1979, Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals, Analytical Chemistry,51(7), s. 844-851.
21. Usero J., Gamero M., Morillo J., Gracia I., 1998, Comparative Study of Three Sequential Extraction Procedures for Metals in Marine Sediments, Environment International, 24, s. 487-496.
22. Vanek A., Grygar T., Chrastný V.,Tejnecký V.,Drahota P.,Komárek M., 2010, Assessment of the BCR sequential extraction procedure for thallium fractionation using synthetic mineral mixtures, Journal of Hazardous Materials, 176(1-3), s. 913-918.
23. Wu G., Kang H., Zhang X., Shao H., Chu L., Ruan C., 2010, A critical review on the bioremoval of hazardous heavy metals from contaminated soils: Issues, progress, eco-environmental concerns and opportunities, Journal of Hazardous Materials, 174, s. 1-8.
24. Żyrnicki W., Smeda A., 2002, Application of Sequential Extraction and the ICP-AES method for Study of the Partitioning of Metals in Fly Ashes, Microchemical Journal, 72, s. 9-16.

Opracowania i raporty z badań

1. BCR Information Reference Materials. The certification of the extractable contents (mass fractions) of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn in freshwater sediment following a sequential extraction procedure, BCR-701. Community Research, Competitive and Sustainable Growth, 2001.

ACKNOWLEDGEMENTS

Źródło finansowania: Politechnika Poznańska 0911/SBAD/2204, 0414/SBAD/3622.

APPLICATION OF CHEMICAL FRACTIONATION PROCEDURES TO ASSESS THE RISK OF ENVIRONMENTAL POLLUTION WITH HEAVY METALS

Abstract

Environmental contamination with heavy metals is a current global problem and requires constant control and monitoring. Speciation of heavy metals is one of the modern research methods that allows to distinguish emission sources and enables the prediction of metal transformations and migration in the environment.

In environmental research for the determination of heavy metals, sequential extraction is used for this purpose, which allows the separation of heavy metals into chemical fractions that, under various natural conditions, can be released into the solution. Mobile forms of metal (based on solubility and bond strength) provide us with information on the bioavailability of the heavy metals being determined and their stable and inactive chemical forms, including the assessment of the degree of incorporation of heavy metals into the biogeochemical cycle. The paper presents procedures using the most commonly used sequential extraction schemes for metal fractionation in soils, sediments and ashes.

Keywords: heavy metals, bioavailability, mobility, sequential extraction.