

BIRD STRIKE, CZYLI ZDERZENIE Z PTAKIEM

PAWEŁ BOGUSZEWICZ, SABINA SALA

Instytut Lotnictwa

Streszczenie

W pracy przedstawiono czynniki wpływające na zjawisko zderzenia ptaka z statkiem powietrznym. Omówiono zagrożenia powodowane tym zjawiskiem, a w szczególności zassanie ciała ptaka przez silnik. Opisano stanowisko badawcze oraz wymagania przepisów. Artykuł zawiera opis metod modelowania komputerowego tych zjawisk.

Słowa kluczowe: zderzenia ptactwa z samolotami. Strefy i skutki zderzeń, badania zderzeń, działo pneumatyczne, badania komputerowe.

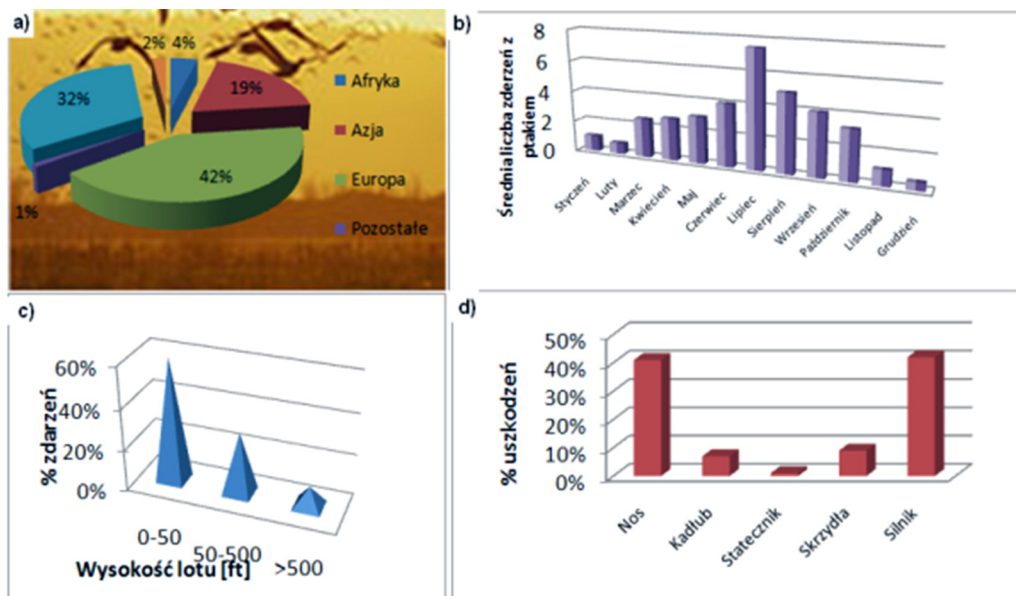
Zjawiska zderzenia ptaka ze statkiem powietrznym (SP) odnotowywane są od początku istnienia lotnictwa. Konstruktorzy jak i użytkownicy z biegiem lat i rozwojem żeglugi powietrznej zaczęli pojmować, że zderzenie z ptakiem może mieć bardzo poważne skutki, zarówno dla samego samolotu, jak i dla ludzi i zwierząt. Odnoszone są również duże straty finansowe związane z przeglądami i naprawą uszkodzonego sprzętu. W związku z narastającą liczbą tych kolizji prowadzone są różnego rodzaju badania tego jakże niebezpiecznego zjawiska. Podejmowane są one zarówno w zakresie zapobiegania temu zjawisku, a także konstruowania statków powietrznych tak, aby poniesione straty były jak najmniejsze. Każde zdarzenie, w którym uczestniczy ptak i samolot musi być zgłoszone do odpowiednich instytucji, w Polsce jest to Urząd Lotnictwa Cywilnego. ULC sporządza statystyki, na podstawie których można przewidzieć jak omawiane zjawisko zmienia się w czasie.



Według raportu FAA w latach 1990–2000 doszło aż do 33 000 zderzeń ptaka ze statkiem powietrznym. Prawdopodobieństwo zderzenia jest różne dla poszczególnych kontynentów, pory roku, wysokości oraz elementów statku powietrznego jak pokazano na (Rys. 1).

Z powyższych analiz jasno wynika, że kolizje z ptakami zależą od wielu czynników. Najwięcej incydentów z udziałem ptaków obserwuje się wiosną, pod koniec lata i na początku jesieni, ponieważ ptaki migrują w dalekie strony świata na czas lęgowy szukając pożywienia. Ze statystyk dobowych widać, że największe prawdopodobieństwo zderzenia z ptakiem występuje od świtu do zmierzchu na wysokościach do 15m (Rys. 1c) i stanowi ono około 65%, związane jest

to z aktywnością ptaków w tym okresie doby. Natomiast najczęstszymi uszkodzeniami podczas incydentów z ptakami ulegają silniki i nos samolotu, bo łącznie aż 83%.



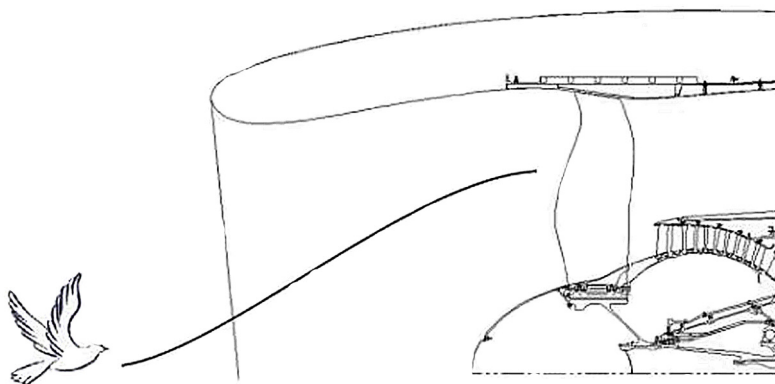
Rys. 1. Prawdopodobieństwo zderzenia ptaka z samolotem wg ICAO w lat 1980-1996 dla różnych: a) kontynentów; b) pory roku; c) wysokości; d) elementów statku powietrznego.

Nie można ignorować zjawiska zderzenia ptaka z samolotem, albowiem prawie zawsze dochodzi do dużych strat zarówno w ludziach jak i materialnych. Wszyscy producenci statków powietrznych, a zwłaszcza silników lotniczych zobowiązani są prawnie do przeprowadzenia odpowiednich testów sprawdzających wpływ zderzenia ptaków różnej wielkości z łopatkami stopni wlotowych sprężarek odrzutowych silników jednoprzepływowych oraz łopat wentylatorów silników dwuprzepływowych.

1. ZDERZENIA PTAKÓW Z SILNIKAMI TURBINOWYMI

W trakcie projektowanie obiektu latającego należy uwzględnić wszelkie niebezpieczeństwa w tym również zderzenie z ptakiem, aby zniwelować wszelkie możliwe uszkodzenia. Zderzenie ptaka ze SP może powodować uszkodzenie konstrukcji płatowca takie jak: niewielkie wgniecenia, penetracja ciała ptaka wewnątrz konstrukcji uszkadzając systemy pokładowe, a nawet przebicie szyby w kabinie pilotów. Szczególnym przypadkiem jest zassanie ptaka przez silnik turbinowy. Zderzenie ptaka z wirującymi z dużą prędkością łopatkami wentylatora lub pierwszego stopnia sprężarki może powodować poważne uszkodzenia silnika. Przepisy wymagają aby silnik mógł być bezpiecznie wyłączony po zderzeniu z ptakiem o masie większej od 3,5kg, a w przypadku zderzenia ze stadem ptaków o masie 2,5kg silnik powinien dostarczać niezbędny ciąg w czasie dotarcia SP do najbliższego lotniska zastępczego. Masa ptaków wykorzystywanych podczas testów zależy od pola powierzchni wlotu silnika. Dla dwuprzepływowych wentylatorowych silników odrzutowych (Rys. 2) szeroko stosowanych w samolotach pasażerskich i transportowych, odporność na zderzenia z ptakami związana jest głównie z wytrzymałością łopatek wentylatora. W samolotach wojskowych, których silniki są zabudowane w kadłubie, istotne

jest prawidłowe uformowanie kanału dolotowego. Ptak może wytracić znaczną część swojej energii poprzez zderzenia ze ścianami tego kanału.



Rys. 2. Widok przekroju wlotu wentylatorowego silnika odrzutowego [7]

Uszkodzenie jednej lub więcej łopatek wentylatora lub pierwszego stopnia sprężarki może powodować znaczący wzrost drgań silnika, ze względu na zmianę rozkładu sił aerodynamicznych i masowych. Łopatki pierwszych stopni sprężarki, których prędkość obwodowa na ich wierzchołkach może przekraczać 400 m/s, są projektowane nie tylko do sprężania powietrza ale również do przecinania ciała ptaka. Prędkość zderzenia po zsumowaniu prędkości we wlocie silnikowym SP i prędkości obrotowej wierzchołka łopatki może sięgać 440 m/s podczas startu i wznoszenia, gdy prędkość obrotowa silnika jest maksymalna. [7]

Wytrzymałość na zderzenia z ptakami jest tylko jednym z wielu wymagań stawianych inżynierom zajmującym się udoskonalaniem wentylatorów i sprężarek. Wspomniane zespoły silnika powinny jednocześnie być optymalizowane pod wieloma innymi względami tj.: sprawność, drgania, masa, erozja, zmęczenie, itd. Rozważmy dla przykładu zwiększenie grubości ścianki łopatki w celu poprawienia odporności na uderzenie ciała obcego. Wzrost masy łopatki powoduje konieczność zastosowania mocniejszej, czyli cięższej tarczy nośnej wirnika, co z kolei powoduje wzrost masy całego silnika. Zwiększenie masy silnika wymaga wzmocnienia konstrukcji skrzydła i podwozia. Dodatkowe obciążenie ma istotny wpływ na osiągi SP przez zwiększenie zużycia paliwa, co jest związane ze wzrostem emisji składników toksycznych w spalinach przy jednoczesnym zmniejszeniu ładunku użytecznego i zasięgu SP.

2. STANOWISKO BADAWCZE

W celu zbadania odporności konstrukcji samolotu i silnika na ewentualne zagrożenia wywołane uderzeniem ptaka, wykonywane są testy na odpowiednim stanowisku badawczym – wyposażonym w działko pneumatyczne umożliwiające strzelenie ciałem ptaka w badany element lub zespół z odpowiednią prędkością. Istotne jest aby podczas rozpędzania ciało ptaka nie przekroczyło dopuszczalnego przyspieszenia, co mogłoby spowodować destrukcję ciała ptaka przed uderzeniem w badany obiekt. Może to spowodować, że wyniki takiego testu nie będą w pełni odzwierciedlać rzeczywistego zderzenia SP z ptakiem podczas lotu. Z tego względu pneumatyczne stanowiska służące do wykonywania tego typu doświadczeń są wyposażone w długą lufę. Przyjmuje się, że przyspieszenie podczas rozpędzania nie powinno przekroczyć wartości:

$50 \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}$ — (wielokrotności 50-ciu normalnych przyspieszeń ziemskich).

Zasada działania typowego stanowiska (Rys. 3) polega na kontrolowanym otwieraniu zaworu łączącego zbiornik ze sprężonym powietrzem z lufą. W lufie umieszcza się ciało ptaka w odpowiednim pojemniku, którego średnica zewnętrzna jest dopasowana do średnicy wewnętrznej lufy. Stopień otwarcia zaworu w początkowej fazie rozpędzania jest odpowiednio regulowany, aby nie przekroczyć dopuszczalnego przyspieszenia, a następnie stopniowo zwiększany - uwzględniając spadek ciśnienia w zbiorniku i wzrost objętości lufy za ciałem ptaka, tak aby droga rozpędzania była jak najkrótsza. Po osiągnięciu wymaganej prędkości ciało ptaka opuszcza lufę, a pojemnik w którym się znajdowało jest zatrzymywany przez odpowiedni hamulec. Pojemnik zostaje zniszczony najczęściej podczas hamowania. Stanowisko badawcze powinno umożliwiać pomiar prędkości ciała ptaka w celu potwierdzenia spełnienia wymagań stawianych przez odpowiednie przepisy. Często pomiar prędkości jest zwielokrotniony aby uniknąć wykonania kosztownej próby, podczas której nie uzyskano wiarygodnego pomiaru prędkości. Wykorzystanie profesjonalnej szybkiej kamery lub kilku kamer, umożliwia oszacowanie prędkości ciała ptaka oraz zarejestrowanie procesów zachodzących podczas zderzenia.



Rys. 3. Działo pneumatyczne [8]

Przed próbą należy zdefiniować następujące warunki:

- Masę, ilość oraz gatunek ptaków,
- Minimalną prędkość ptaka, zazwyczaj jest ona przyjmowana jako równa przelotowej prędkości samolotu, lub ustaloną w przepisach (bliską prędkości przepływu powietrza w kanale przepływowym przed wlotem do silnika)
- Maksymalne przyspieszenie ptaka w czasie rozpędzania

Parametry rejestrowane:

- Prędkość ptaka,
- Masę ptaka,
- Miejsce wlotu ptaka,
- Ślady po uderzeniu,
- Film szybka kamera.

Próby wykonywane na działającym silniku powinny odbywać się podczas pracy silnika w warunkach startowych. Ciało ptaka powinno być wstrzeliwane przez „Płatowcowy kanał wlotowy”. [6]

3. WYMAGANIA PRZEPISÓW FAR 33.76

Przepisy FAR 33.76 dotyczące „próby ptaka”, mają na celu wykazanie, że konstrukcja silnika jest odporna na zderzenia z ptakami, które są ściśle określone poniżej.

Wszystkie próby należy przeprowadzać w warunkach stabilnej pracy silnika na zakresie jego 100% mocy (ciągu silnika odrzutowego). Pole powierzchni wlotowej silnika definiuje masę i liczbę ptaków „wstrzeliwanych” do działającego silnika.

Wykonywane są trzy typy testów.

3.1. Pojedynczy duży ptak

Test jest przeprowadzany przy użyciu jednego ptaka dobranego zgodnie z Tabelą 1.

Tabela 1. Dobieranie masy ptaka w próbie „Pojedynczy duży ptak”

Powierzchnia wlotowa silnika A [m ²]	Masa ptaka [kg]
1,35 > A	1,85
1,35 ≤ A < 3,90	2,75
3,90 ≤ A	3,65

Strzał jest wykonywany w najbardziej krytyczne miejsce pierwszego stopnia sprężarki lub wentylatora, wyznaczone zgodnie z procedurami.

Prędkość strzału jest równa prędkości przelotowej SP nie mniejszej niż 100m/s. Nie dopuszcza się przesunięcia dźwigni mocy silnika w ciągu 15 sekund po uderzeniu. Dla testów wykonywanych dużym ptakiem całkowita utrata mocy lub ciągu po zderzeniu jest akceptowalna.

3.2. Stado małych i średnich ptaków

Test jest przeprowadzany w taki sposób, aby symulować zderzenie ze stadem ptaków, gdzie ilość i masa ptaków jest dobierana według Tabeli 2.

Tabela 2. Dobieranie masy ptaka w próbie „Stado małych i średnich ptaków”

Powierzchnia wlotowa silnika A [m ²]	Liczba ptaków	Masa ptaka [kg]
0,05 > A	0	-
0,05 ≤ A < 0,10	1	0,35
0,10 ≤ A < 0,20	1	0,45
0,20 ≤ A < 0,40	2	0,45
0,40 ≤ A < 0,60	2	0,70
0,60 ≤ A < 1,00	3	0,70
1,00 ≤ A < 1,35	4	0,70
1,35 ≤ A < 1,70	1	1,15
	3	0,70
1,70 ≤ A < 2,10	1	1,15
	4	0,70
2,10 ≤ A < 2,50	1	1,15
	5	0,70
2,50 ≤ A < 3,90	1	1,15
	6	0,70
3,90 ≤ A < 4,50	3	1,15
4,50 > A	4	1,15

W wyniku wykonania testu nie może nastąpić:

- Strata powyżej 25% mocy,
- Wyłączenie silnika w trakcie badania,
- Niedopuszczalne pogorszenie innych istotnych parametrów pracy silnika.

Po wykonaniu strzału silnik powinien pracować zgodnie z poniższym harmonogramem badań (nie dotyczy wiroplątów)

- 2 min. bez poruszania dźwigni mocy silnika,
- 3 min. - 75% mocy,
- 6 min. - 60% mocy,
- 6 min. - 40% mocy,
- 1 min. - w trybie lądowania,
- 2 min. - 75% mocy,
- stabilizacja pracy w trybie lądowania, a następnie wyłączenie silnika,

Dla wiroplątów harmonogram pracy po wykonaniu strzału jest następujący:

- 3 min. - 75% mocy,
- 90 sek. w trybie autorotacji,
- 30 sek. 75% mocy,
- stabilizacja pracy w trybie lądowania, a następnie wyłączenie silnika,

3.3. Stado dużych ptaków

Test jest przeprowadzany w taki sposób aby symulować zderzenie ze stadem ptaków, gdzie ilość i masa ptaków jest dobierana wg. Tabeli 3.

Tabela 3 Dobieranie masy ptaka w próbie „Stado dużych ptaków”

Powierzchnia wlotowa silnika A [m ²]	Liczba ptaków	Masa ptaka [kg]
2,50 > A	0	-
2,50 ≤ A < 3,50	1	1,85
3,50 ≤ A < 3,90	1	2,10
3,90 < A	1	2,50

Prędkość uderzenia 100 m/s

Praca silnika podczas próby powinna odpowiadać 90% mocy.

W wyniku wykonania testu nie może nastąpić:

- Strata powyżej 50% ciągu lub mocy w trakcie badania,
- Wyłączenie się silnika w trakcie badania,
- Niedopuszczalne pogorszenie innych istotnych parametrów pracy silnika.

Po wykonaniu strzału silnik powinien pracować zgodnie z poniższym harmonogramem badań:

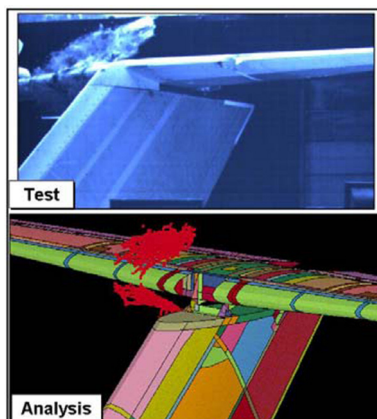
- 1 min. - bez poruszania dźwigni mocy silnika,
- 13 min. - nie mniej niż 50% ciągu lub mocy,
- 2 min. - pomiędzy 30% a 35% ciągu lub mocy,
- 1 min. - pomiędzy 5% a 10% ciągu lub mocy,
- 1 min. - na biegu jałowym i wyłączenie silnika.

4. MODELOWANIE KOMPUTEROWE „PRÓBY PTAKA”

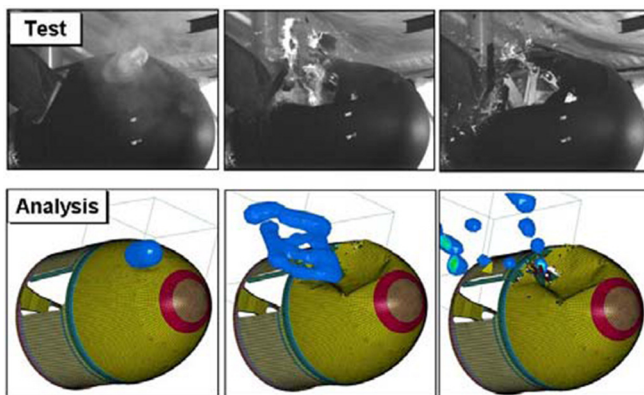
Stworzenie komputerowego modelu zderzenia SP z ptakiem jest zadaniem bardzo skomplikowanym, zawierającym wiele utrudnień numerycznych. Do głównych problemów przy tworzeniu tego typu modelu zaliczyć się:

- Określenie charakterystyki materiału ciała ptaka,
- Numeryczną niestabilność spowodowaną wysokim stopniem deformacji i rozpadem ciała ptaka w trakcie uderzenia,
- uwzględnienie nieliniowej dynamiki zarówno materiału jak i geometrii uderzonej części.[1]

Prowadzone obecnie analizy i symulacje numeryczne opisywanego zjawiska dają zbliżone wyniki do tych uzyskanych z prób rzeczywistych. Liczne publikacje prezentują modele obliczeniowe zderzenia ciała ptaka zarówno z powierzchniami płatowca, jak również zassanie ptaków do silników turbinowych. Modelowanie testów umożliwia wykrycie i poprawienie na stosunkowo wczesnym etapie projektowania niedoskonałości konstrukcji. Tego typu działania prowadzą do oszczędności środków finansowych i czasu w przypadku zdiagnozowania wspomnianych niedoskonałości na etapie badań. Na kolejnych rysunkach przedstawiono skutki rzeczywistych uszkodzeń konstrukcji oraz osiągnięte z obliczeń numerycznych.



Rys. 4. Porównanie wyników analizy numerycznej i testu rzeczywistego zderzenia ptaka ze statecznikiem poziomym pionowzlotu BA 609 [1]



Rys. 5. Porównanie wyników analizy numerycznej i testu rzeczywistego zderzenia ptaka z osłoną piasty wirnika pionowzlotu BA 609 [1]

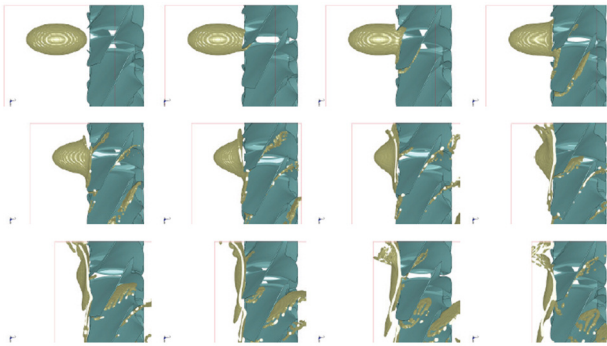
Istnieje pięć metod modelowania ciała ptaka podczas wykonywania tego typu analiz:

FE model jest szeroko stosowany, znany od ponad 20 lat, zapewniający dokładne wyniki do chwili, kiedy ptak został poddany ogromnym deformacjom. Zaletą tej metody jest krótki czas wykonania obliczeń oraz stosunkowo niskie wymagania sprzętowe. Niemniej jednak ten model nie jest dostatecznie ścisły do analizowania zderzeń, podczas których nastąpi znaczna deformacja modelu ptaka, ponieważ często uniemożliwia uzyskania poprawnego zakończenia symulacji.

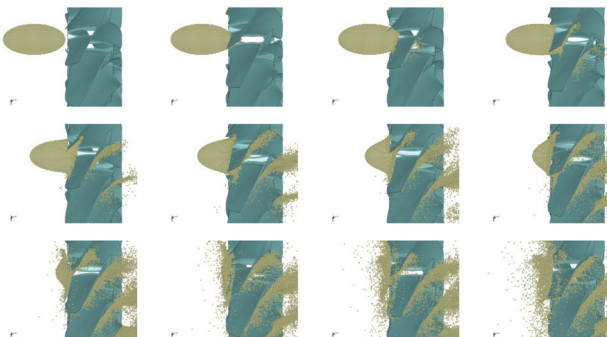
Eulerian i Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) model ten w porównaniu z FE pozwala na osiągnięcie poprawnego końca symulacji, lecz nadmierne rozciągnięcie siatki wywołuje wątpliwości co do prawidłowości tego rozwiązania (Rys. 6 i Rys. 8). Do wad tego modelu są zaliczane: brak ostrych granic, dyfuzja, wysokie wymagania sprzętu obliczeniowego.

Nodal Masses model (NM) inaczej zwany Discrete Element Method (DEM). Model zbudowany jest z węzłów, którym jest przypisana masa. Wyniki zastosowania tego modelu są bardzo zbliżone do danych uzyskanych w rzeczywistych testach. Główną wadą tego modelu jest brak wewnętrznej interakcji między węzłami masowymi siatki, co powoduje brak mechanizmów rozpraszania powodujących z kolei nierealistyczne zachowanie ciała ptaka podczas symulacji.

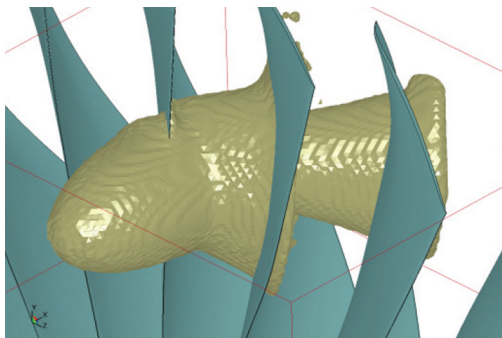
Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) jest to metoda oparta o w/w kod FE, stosowana głównie do analizowania problemów charakteryzujących się dużymi deformacjami. Metoda SPH jest odporna na problem zniekształcenia siatki (Rys. 7). Wyniki uzyskiwane metodą SPH, podobnie jak metodą NM, są zbliżone do wyników rzeczywistych. Metodą SPH jest uzyskiwane „rozsądne” zachowanie ciała ptaka podczas symulacji oraz porównywalne z zachowaniami nagranymi szybko kamerą podczas rzeczywistych testów.



Rys. 6. Interakcja łopatek wentylatora z ciałem ptaka modelowanym technika ALE[5]

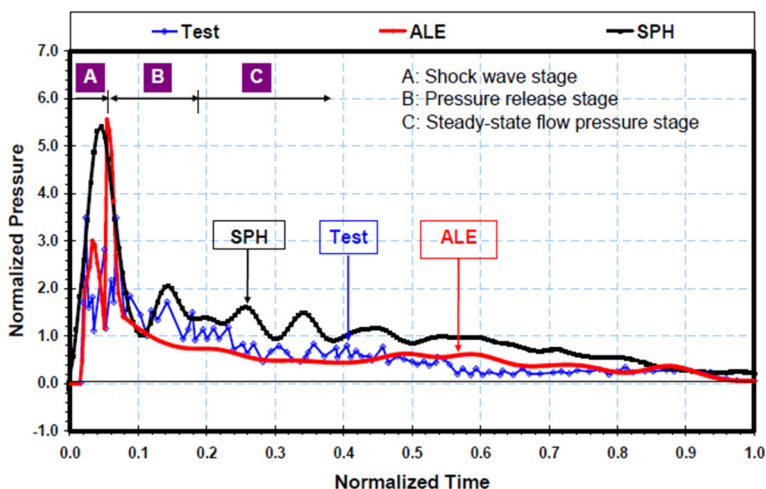


Rys. 7. Interakcja łopatek wentylatora z ciałem ptaka modelowanym technika SPH[5]



Rys. 8. Interakcja łopatek wentylatora z ciałem ptaka modelowanym techniką ALE [5]

Podsumowując, modele SPH i ALE (Rys. 9) zostały uznane za wiarygodne i umożliwiające wykonanie dokładnych analiz dynamiki zderzeń, a więc mogą być stosowane jako część metodologii projektowania zespołów odpornych na zderzenia z ptactwem.[4]



Rys. 9. Porównanie przebiegów ciśnień uzyskanych przy komputerowym modelowaniu zderzenia z ptakiem (wykorzystując techniki ALE i SPH) z wynikami uzyskanymi podczas rzeczywistego testu, gdzie: ALE- Arbitrary Lagrangian-Eulerian; SPH- Smooth Particle Hydrodynamics)[1]

5. PRZECIWDZIAŁANIE

Zwalczanie ptaków z przestrzeni powietrznej i okolic lotniska wydaje się być „szyfrową pracą”, albowiem żadne obecnie stosowane metody nie są w stanie ich całkowicie wyeliminować. W walce z ptakami stosuje się najczęściej naturalne sposoby. Zalicza się do nich:

- Odtwarzanie dźwięków odstrasających (Krzyki ptaków drapieżnych)
- Tresowane psy i specjalnie szkolone ptaki
- Zmiana ekologii lotnisk np.: odwadnianie terenu, ścinanie traw

Do zniechęcenia ptaków wykorzystuje się również osiągnięcia techniki, tzn.: odstraszenie akustyczne, odstraszenie wizualne, chemiczne – odstrasające i porażające. Do odstraszenia akustycznego mogą być stosowane armatki gazowe, jednak mają one niewielki zasięg. Natomiast

urządzenia pirotechniczne należą do tego samego sposobu płoszenia ptaków znajdujących się nad lotniskiem. Odstraszanie wizualne polega na rozstawieniu na terenie portu różnego rodzaju strachów, chorągiewek i taśm oraz świateł. Zwalczanie ptaków środkami chemicznymi typu porażającego powodujące śmierć ptaków. Zalicza się do nich: środki silnie trujące, środki utrudniające krzepnięcie krwi oraz środki duszące.

Aby zwiększyć skuteczność omówionych metod należy je stosować naprzemiennie z różnym nasileniem i krótkotrwale, ponieważ ptaki przyzwyczajają się i przestają się bać, co w rezultacie oznacza ich powrót w okolice lotniska.

Innym działaniem, które powinno być podejmowane na lotniskach, jest odpowiedzialne szkolenie personelu jak efektywnie działać w obliczu zagrożenia. Powinno się im uświadamiać jak niebezpiecznym dla SP zjawiskiem jest zderzenie z ptakiem. Aby dodatkowo zmniejszyć ryzyko zderzenia statku powietrznego z ciałem obcym należy odpowiednio planować (ich częstotliwość, pory doby... itp.) i wykonywać loty.

PODSUMOWANIE

Z punktu widzenia ekologii najważniejsze są zwierzęta i ich naturalne środowisko, jednak gdy w grę wchodzi ludzkie życie stają one na drugim miejscu. Zderzenie ogromnej maszyny z ptakiem może wydawać się błahostką, jednak rzeczywistość udowadnia, że jest to bardzo niebezpieczne. Jeżeli nawet dojdzie do na pozór niegroźnej kolizji z ptakiem, stan techniczny samolotu musi zbadać technik specjalista.

Opisane metody zwalczania ptaków nie są w stu procentach skuteczne, jednak pomagają zmniejszyć liczbę kolizji. Dlatego władze lotnisk i organizacje międzynarodowe prześcigają się w pomysłach jak skutecznie obniżyć ilość incydentów z ptakami. Poza wszelkiego rodzaju odstraszaniem i zniechęcaniem ptaków trzeba odpowiednio szkolić pilotów i personel naziemny, aby potrafili szybko i skutecznie reagować na zagrożenie. Duże nadzieje pokłada się w konstruktorach statków powietrznych, którzy przy wykorzystaniu obecnej wiedzy i możliwościach obliczeniowych będą tak projektować elementy samolotów aby miały jak największą odporność na tego typu incydenty.

Instytut Lotnictwa dysponuje odpowiednim stanowiskiem i specjalistami o niezbędnej wiedzy praktycznej i teoretycznej do prowadzenia badań zgodnie z obowiązującymi przepisami. Obecnie przeprowadzane są próby zderzenia przedniej szyby lokomotywy z tzw. ciałem obcym, zgodnie z wymaganiami obowiązującymi w kolejnictwie.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Anghileri M. "Birdstrike: approaches to the analysis of impacts with penetration" Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale, Politecnico di Milano, Italy
- [2] Balicki W., Orkisz M. „Turbinowe silniki lotnicze w ujęciu problemowym” rozdział: Wybrane zagadnienia dotyczące prób turbinowych silników lotniczych w hamowniach stacjonarnych, Lublin, 2000.
- [3] Cheng-Ho Tho, Smith M. R. "Accurate bird strike simulation methodology for BA609 Tiltrotor", Bell Helicopter Textron Inc., Fort Worth, Texas
- [4] Demers C. G. „Large Air Transport Jet Engine Design Considerations for Large and for Flocking Bird Encounters" Bird Strike North America Conference, 2009
- [5] Guida M. „Study, Design and Testing of Structural Configurations for the Bird-Strike Compliance of Aeronautical Components" University of Naples, 2008
- [6] Ptaszyński M. "Założenia próby ptaka" Instytut Lotnictwa, Warszawa 1983

-
- [7] Ryabov, Alexander A. "Fan Blade Bird Strike Analysis Using Lagrangian, SPH and ALE Approaches" 6th European LS-DYNA Users' Conference
- [8] Szczeciński S. (pod red.) "Lotnicze zespoły napędowe" rozdział 3: Wloty, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa , 2009.