

WPŁYW TURBULENCJI WYWOŁANEJ OPŁYWEM BUDYNKÓW ORAZ POŻAREM NA BEZPIECZEŃSTWO LOTÓW ŚMIGŁOWCA

MATEUSZ KANIA

Instytut Lotnictwa

Streszczenie

W referacie przedstawiony został wpływ lokalnych turbulencji wywołanych opływaniem przez powietrze budynków, na zachowanie się śmigłowca podczas lotu na niskich wysokościach. Loty takie wykonywane są między innymi podczas akcji ratowniczych oraz gaśniczych, jak również są coraz bardziej popularne w lotach komercyjnych. Powietrze omywające strukturę budynków może wykazywać różne właściwości opływu w zależności od prędkości, kierunku strug, jak również geometrii samego opływającego obiektu, dlatego w określonych warunkach może ono znacząco wpływać na zmniejszenie bezpieczeństwa lotu. Szczególne przypadki dla których przeprowadzono analizę to zawis od strony zawietrznej budynku oraz lot w turbulencji wywołanej przez grupę budynków.

W pracy zaprezentowano również zagrożenia wynikające z wykonywania lotów w obszarach pożaru, w szczególności pożarów wysokich budynków i otwartych przestrzeni. Przeprowadzono symulację wykonania zawisu nad palącym się wysokim budynkiem, wpływ konwekcji wywołanej nagrzaniem budynku przez słońce na lot śmigłowca, zawis nad pożarem niewielkiego obiektu takiego jak samochód oraz lot nad pożarem dużego obszaru takiego jak palący się las.

Analizy wpływu wyżej opisanych turbulencji przeprowadzone zostały dla śmigłowców Eurocopter EC-135, Eurocopter EC-145, PZL W3A „Sokół” oraz Robinson R44. Obliczenia zostały wykonane metodą CFD w oprogramowaniu Ansys Fluent™.

Przeprowadzone obliczenia wskazują na szczególne przypadki użytkowania śmigłowców na niskich wysokościach, których wystąpienie znacząco zmniejsza bezpieczeństwo lotu, bądź może doprowadzić do wypadku statku powietrznego.

1. WSTĘP

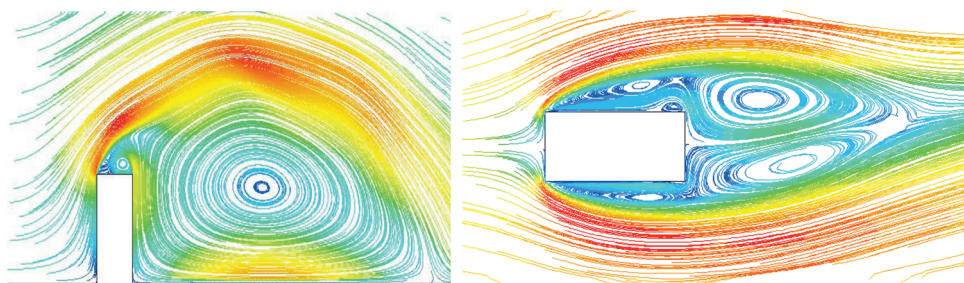
Celem tej publikacji jest przedstawienie niebezpieczeństw podczas wykonywania lotów śmigłowcami lekkimi w turbulencji wywołanej opływem budynku oraz różnego rodzaju pożarami. W pracy przedstawione zostały manewry, w których istnieje możliwość wytworzenia przez wirnik w stanu pierścienia wirowego co jest szczególnie niebezpieczne podczas wykonywania lotów ratunkowych i gaśniczych przez śmigłowce ciężkie oraz obserwacyjne śmigłowce lekkie (np. śmigłowce telewizji). Wszystkie obliczenia zostały wykonane dzięki użyciu oprogramowania ANSYS FLUENT. Przedstawione wyniki są pierwszym przybliżeniem problemu.

2. TURBULENCJE NA MAŁYCH WYSKOŚCIACH

2.1. Turbulencja wywołana opływem budynków

Turbulencja wywołana opływem budynków ma bardzo istotne znaczenie podczas lotów śmigłowców w obszarach silnie zurbanizowanych. Loty takie są coraz bardziej popularne. Powietrze omywające strukturę budynków może wykazywać różne właściwości opływu w zależności od prędkości, kierunku strug, jak również geometrii samego opływającego obiektu.

Budynki wolnostojące lub znajdujące się w znacznej odległości od innych zabudowań podczas ruchu powietrza, stanowią dla niego przeszkodę i podczas ich omywania następuje znaczny wzrost ciśnienia, zwiększenie prędkości przepływu jak również oderwania strug w warstwie przysciennej. Jednym z przypadków takiego zjawiska jest opływ budynku o dużych gabarytach przez powietrze o wektorze prędkości skierowanym w kierunku poziomym. Tak jak przedstawiono na rysunku 1, podczas takiego przepływu po stronie, z której napływają strugi występuje niewielkie zturbulizowanie, a w związku z tym jest to miejsce bardziej bezpieczne do lotu śmigłowca. Po stronie przeciwnej, „zawietrznej”, występuje silna turbulencja, wytwarza się wir znacznych rozmiarów, w którym prędkość zaraz przy ścianie budynku ma kierunek pionowy o zwrocie do góry.



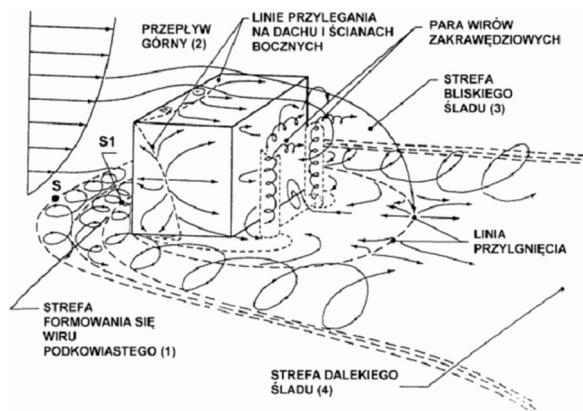
Rys. 1. Obraz linii prądu wokół obiektu prostokątnego umieszczonego w poziomym przepływie, widok „z boku” i widok z góry

Drugim wirami powstającym podczas opływu takiego obiektu jest, przy odpowiednim dobrze liczby Reynoldsa, powstanie wirów na krawędziach lub ścianach bocznych budynków. Wiry te gdyby nie interferowały z wyżej opisaną turbulencją tworzyłyby idealną ścieżkę von Karmana z cyklicznie odrywającymi się wirami po obu stronach budynku. Zjawisko to jest niebezpieczne ze względu na znaczne różnice prędkości pomiędzy centrum wiru, a jego zewnętrznym pierścieniem. Zawirowanie to może występować przy każdym rodzaju geometrii budynku, czy to o przekroju prostokątnym, kołowym czy eliptycznym.

Połączenie wyżej opisanego zjawiska w jeden model opływu jest trudne w opisie analitycznym ze względu na silną interferencję pomiędzy tak stworzonymi wirami, lecz przybliżenie jakie daje nam możliwość użycia modelu numerycznego pozwala nam określić, które ze zjawisk ma decydujący wpływ na tworzenie turbulencji po stronie zawietrznej. Istotnym czynnikiem w tej osobliwej walce dwóch zaburzeń ma prędkość wiatru oraz geometria w przekroju poprzecznym budynku.

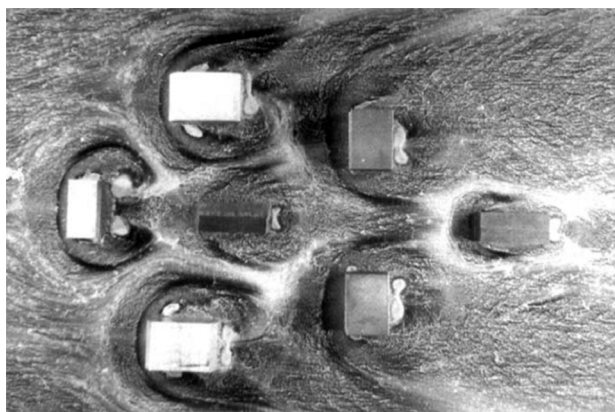
Na rysunku 2 widoczne są obszary charakterystyczne dla tego typu przepływu: obszar formującego się przed obiektem wiru podkowiastego (1), przepływ górny (2), rejony bliskiego (3) i dalekiego (4) śladu. Zaznaczono tutaj także dwa podstawowe punkty separacji – pierwotny S i wtórny S1, występujące w procesie tworzenia się wiru podkowiastego. Odległość punktu wtórnej separacji od obiektu daje przybliżony wymiar wiru podkowiastego, natomiast linia

przechodząca przez punkt separacji pierwotnej wyznacza zakres oddziaływania ujemnego gradientu ciśnienia wywołanego obecnością modelu. Zasięg bliskiego śladu określa linia przylegania przepływu górnego do podłoża.



Rys. 2. Schemat opływu bryły prostopadłościennej umieszczonej na podłożu (wg Hoskera) [3]

Podczas opływu grupy budynków o różnych wysokościach, kształtach, rozmieszczeniu oraz w różnych odległościach uniemożliwia opracowania modelu na drodze analitycznej, więc sposób omywania tych obiektów oraz analiza turbulencji wywołanej przepływem może odbyć się jedynie na drodze numerycznej lub eksperymentalnej. Silna interferencja pomiędzy przepływami wokół kilku budynków może być podzielona na mniejsze elementy, które następnie jako oddzielne elementy również interferują ze sobą.



Rys. 3. Schemat opływu grupy obiektów modelowane przy pomocy mieszaniny oleju parafinowego, kwasu olejowego i tlenku tytanu TiO_2 [3]

2.2. Turbulencja wywołana pożarem

Kolejną turbulencją mogącą stanowić niebezpieczeństwo dla eksploatacji śmigłowców jest zawis, nagłe wtargnięcie lub przelot przez strefę konwekcji wywołanej przez pożar. Konwekcja jest to proces przenoszenia energii cieplnej wynikający z ruchu materii w objętości dowolnej substancji, a w tym przypadku powietrza. Jest jednym z kilku mechanizmów transportu

energii cieplnej i jest ona silnie uzależniona od rodzaju substancji i warunków, w jakich zachodzi. Konwekcja swobodna jest zjawiskiem wywołanym poprzez różnice gęstości substancji lub różnice temperatur. Konwekcja ta ma cechy słupa gorącego powietrza unoszonego z pewną prędkością ku górze.

Pożar budynku jest specyficznym rodzajem pożaru oraz towarzyszącej mu konwekcji swobodnej. Podczas opływu budynku na krawędzi dachu zaczyna tworzyć się podobne zjawisko do tego opisanego przy omywaniu budynków przez wiatr w kierunku poziomym, a mianowicie zjawisko ścieżki von Karmana. Struga powietrza unoszona pod wpływem zwiększenia temperatury po napotkaniu krawędzi dachu odrywa się tworząc cykliczne wiry. Dokładniej to zjawisko zostało opisane podczas omawiania opływu budynków.



Rys. 4. Rzeczywisty przypadek badanego pożaru wysokiego budynku.
Z prawej strony widoczny śmigłowiec ratunkowy [5]

Konwekcja wywołana przez pożar obiektów o znacznej powierzchni takich jak pożar lasów, łąk, obiektów sportowych, hal targowych, hal produkcyjnych, stacji paliw ma zupełnie inny charakter niż ta wywołana przez pożar budynku o dużej wysokości. Przy takim rodzaju unoszenia powietrza mamy do czynienia ze zwartym słupem rozgrzanego gazu o prędkości około 10 m/s w kierunku pionowym już przy średniej wielkości pożarze. Przelot śmigłowca przez taką strefę turbulencji jest bardzo podobna do stanu lotu jakim jest opadanie.



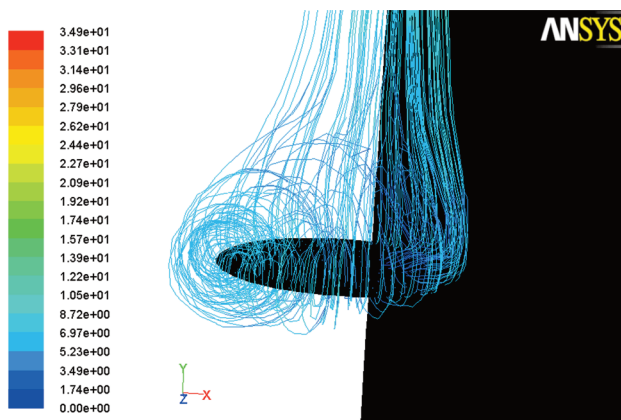
Rys. 5. Lot w turbulencji wywołanej przez pożar obszarów płaskich [5]

3. ANALIZA WPLYWU ZABURZEŃ NA LOT ŚMIGŁOWCA

Wszystkie analizy przedstawione w tej pracy oparte zostały na modelu obliczeniowym *Spalart-Allmaras* oprogramowania ANSYS FLUENT. Obliczenia przeprowadzone zostały z włączoną funkcją podwójnej precyzji na solverze *Transient* bazującym na czasie oraz solverze *Pressure-Based* bazującym na ciśnieniu. Każdy model wyposażony został w warunki brzegowe opisujące przyspieszenie ziemskie o wartości $9,81 \text{ m/s}^2$. Ze względu na specyfikę modelu powietrze zostało uznane za gaz idealny co uprościło i przyspieszyło obliczenia. W każdym z analizowanych modeli zastosowano dyskretyzację za pomocą funkcji *Green-Gauss Node Based*. Dla zmiennych używanych w obliczeniach pozostawiono wartości domyślne.

3.1. Opływ budynków

Analiza turbulencji wywołanej opływem wolnostojącego budynku przeprowadzona została ze względu na możliwość wystąpienia niebezpiecznych warunków lotu śmigłowca w szczególności od strony zawietrznej. Badania przeprowadzono dla dwóch typów śmigłowców: *Eurocopter EC-135* oraz *Robinson R44*. Na rysunku 6 przedstawiono manewr zawisu śmigłowca *EC-135* przy ścianie wysokiego budynku (INTRACO) po stronie zawietrznej. Wymiary budynku użytego do analiz to $100 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 25 \text{ m}$. Śmigłowiec *EC-135* w Polsce jest wykorzystywany przez Lotnicze Pogotowie Ratunkowe, co uzasadnia przeprowadzania analiz dla tego modelu śmigłowca. Podczas tego manewru symulowany był wiatr o wartości 20 m/s . Przedstawiony manewr może być wykonany podczas prób gaśniczych lub startu śmigłowca po stronie zawietrznej.

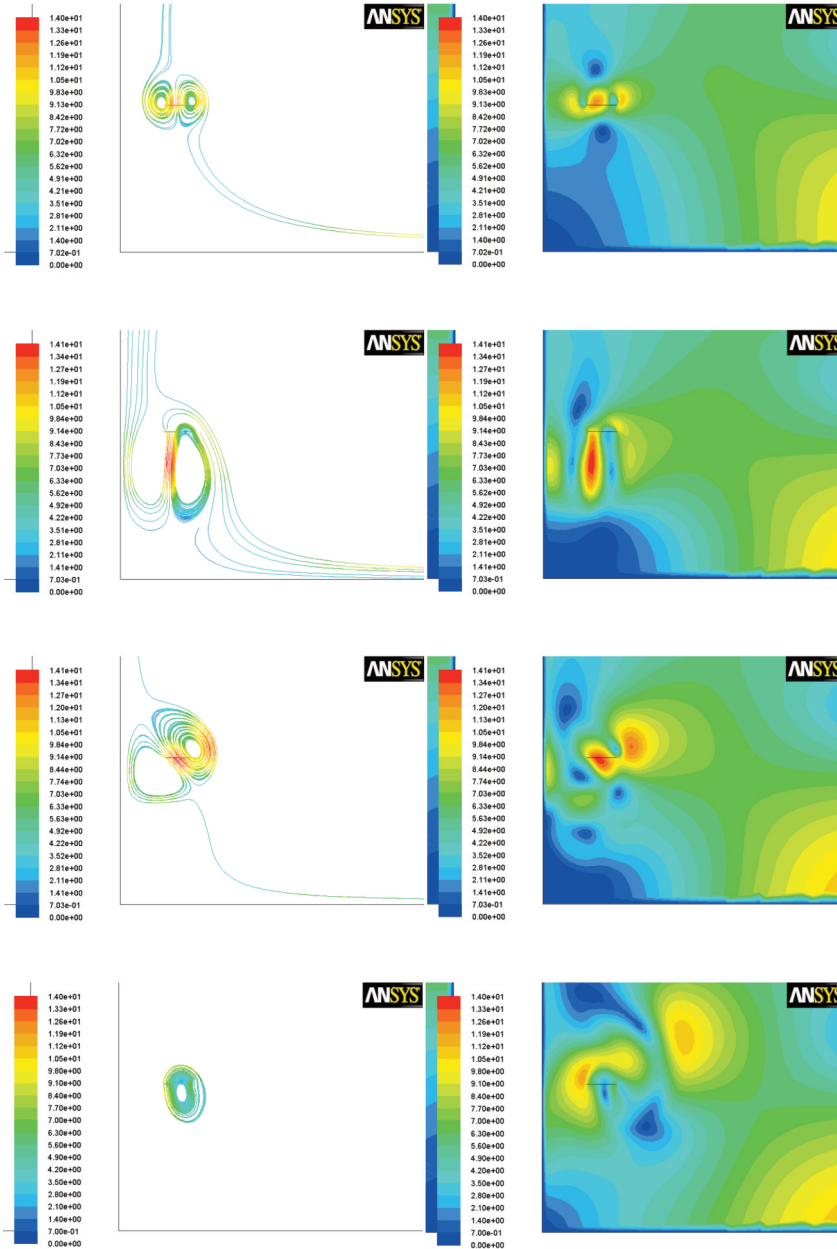


Rys. 6. Linie prądu obrazujące stan pierścienia wirowego podczas wykonywania manewru zawisu po stronie zawietrznej wysokiego budynku

Jak widać na powyższym rysunku na tarczy wirnika nośnego, po nagłym wtargnięciu w strefę turbulencji za ścianą budynku, generuje się pierścień wirowy. Stan pierścienia wirowego utrzymuje się na nieruchomej tarczy wirnika przez co można wywnioskować, że na tak małej wysokości zawisu jaką jest 50 m do 70 m nad ziemią w okolicy jednej czwartej od bocznej krawędzi budynku znajduje się obszar szczególnie niebezpieczny ze względu na brak możliwości uwolnienia się od tego zjawiska.

Analiza tego samego przypadku nagłego wtargnięcia w strefę turbulencji po stronie zawietrznej wysokiego budynku dla mniejszego śmigłowca *R44* wykazuje podobne zagrożenie lotów w tym obszarze z tym, wystąpienie pierścienia wirowego może nastąpić przy znacznie

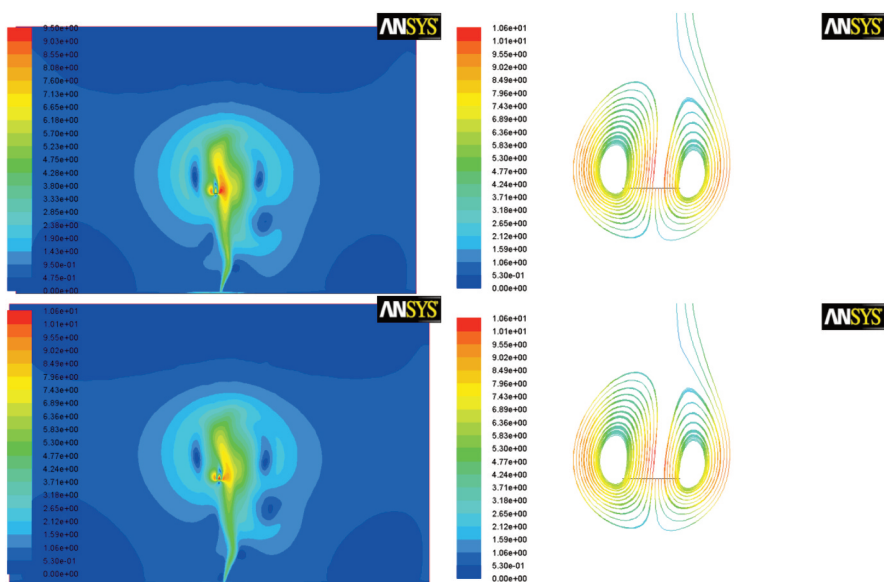
mniejszej wartości prędkości. Przypadek prezentowany na rysunku 7 obrazuje zachowanie się pierścienia wirowego na wirniku nośnym za pomocą linii prądu przy prędkości opływu 10 m/s. Widoczne jest charakterystyczne pulsowanie ciągu. W rzeczywistości nie byłibyśmy w stanie zaobserwować tego zjawiska na tak małej wysokości ze względu na znaczną utratę mocy niezbędnej do lotu i szybkie opadanie śmigłowca.



Rys. 7. Kolejne etapy tworzenia się pierścienia wirowego na wirniku nośnym śmigłowca R44 w odstępach czasowych 5 s. Z lewej strony przedstawione są linie prądu, zaś z prawej odpowiadające im mapy konturowe prędkości

3.2. Loty nad pożarami

Zaburzenia wywołane przez pożar otwartej przestrzeni takiej jak łąka lub las są z reguły bardzo ryzykowne. Loty wykonywane w takich warunkach są bardzo częste w szczególności w krajach basenu morza śródziemnego lub krajów, w których często występują susze. Krajem takim może być na przykład Australia. Loty takie są szczególnie niebezpieczne ponieważ w takich warunkach lata się z zewnętrznym podwieszeniem do gaszenia pożaru, jak również sam lot nad otwartym ogniem jest szczególnie stresujący dla pilota. Przystawiony na rysunku 8 przypadek opisuje manewr zawisu lub nagłego wtargnięcia w konwekcję wywołaną przez rozległy pożar o wymiarach 200m na 100m dla śmigłowca *Robinson R44*. Podobne obliczenia przeprowadzone zostały dla śmigłowców *EC-135* oraz *W3A Sokół* dla różnych stanów lotu.

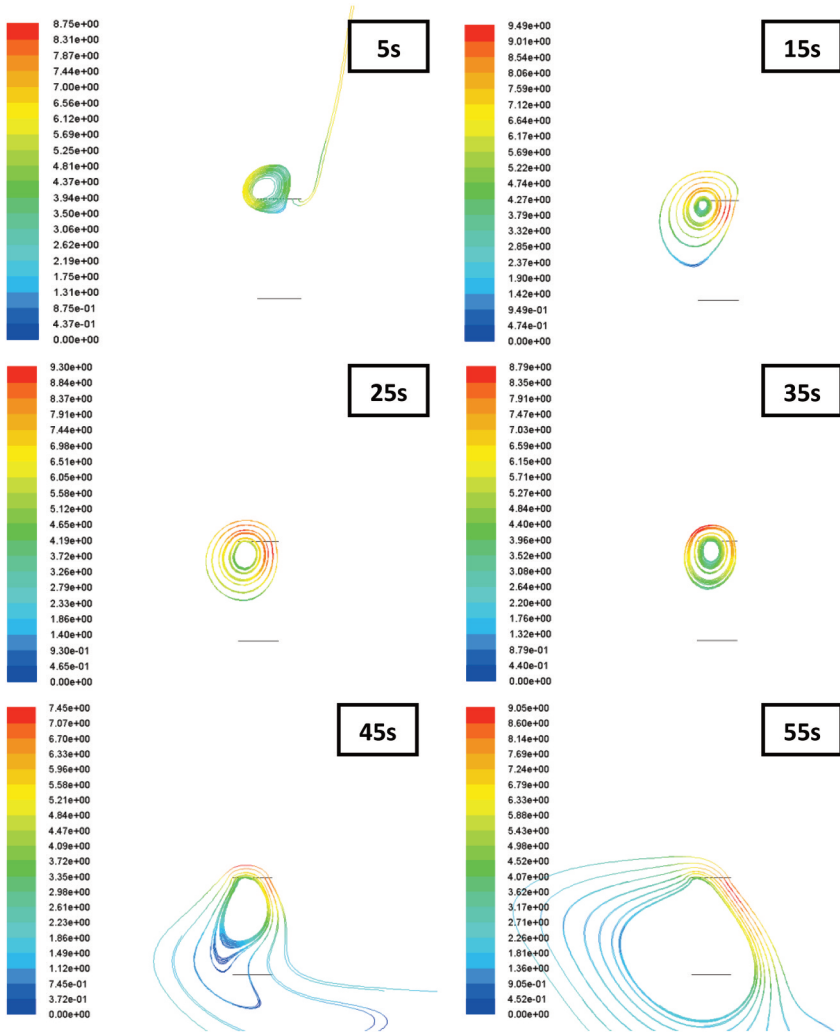


Rys. 8. Linie prądu oraz mapy konturowe obrazujące stan pierścienia wirowego podczas wykonywania manewru zawisu nad pożarem. Kolejne slajdy w odstępie 10 s

Ze względu na brak większych niebezpieczeństw podczas wykonywania lotów ratunkowych lub gaśniczych nad pożarami wysokich budynków postanowiono przeprowadzić obliczenia dla śmigłowca *EC-135* wykonującego manewry w konwekcji wywołanej znacznie większym pożarem.

Turbulencja wywołana przez konwekcję pochodzącą z pożaru analizowano na podstawie modelu dwuwymiarowego gdzie obiektem analiz był budynek o wymiarach 100 m wysokości na 25 m szerokości i był podobny do budynku INTRACO znajdującego się w Warszawie. Pożar znajdował się na 80% analizowanego budynku. Analizy wstępne przeprowadzone zostały bez udziału kadłuba śmigłowca ze względu na pierwsze przybliżenie problemu. Pożar był modelowy jako konwekcja z nagranych ścian budynku do temperatury 1200 K. Jest to najprostszy sposób zamodelowania tego zjawiska więc należy je traktować jako pierwsze przybliżenie. Podczas tworzenia siatki umieszczono na różnych wysokościach wirniki nośne. Miało to na celu zasymulowanie wtargnięcia śmigłowca w najbardziej niebezpiecznych warunkach i skróceniu czasu obliczeń ze względu na możliwości rozpatrywania różnych przypadków lotu w różnych warunkach turbulencji. Zabieg ten nie wpływa na wyniki ze względu na to że tarcza wirnika jest wtedy nie aktywna i nie stanowi bariery dla prądu wznoszącego.

Na rysunku 9 przedstawiono kolejne fazy generowania się pierścienia wirowego w odstępach 10 sekundowych na tarczy wirnika nośnego śmigłowca *Eurocopter*.



Rys. 9. Wyniki obliczeń wtargnięcia śmigłowca EC-135 w turbulencję wywołaną pożarem budynku INTRACO. Wizualizacja pierścienia wirowego przedstawiona za pomocą linii prądu wraz ze skalą prędkości. Kolejne slajdy są ilustracjami wygenerowanymi w odstępach 10 sekundowych

4. WNIOSKI

Podczas przeprowadzania analiz dla przedstawionych turbulencji wykonano szereg symulacji w celu odnalezienia warunków skrajnie niebezpiecznych dla lotu. Odnaleziono kilka manewrów, które mogą wpłynąć na bezpieczeństwo lotów. Znajomość przez pilotów śmigłowców takich niestandardowych obszarów, w których istnieje możliwość wpadnięcia w pierścień wirowy, w szczególności na małych wysokościach, jest bardzo istotne w celu zwiększenia bezpieczeństwa lotów tymi statkami powietrznymi.

Model opływu budynku i lotu śmigłowca w wywołanej przez ten opływ turbulencji wskazują, że oba analizowane śmigłowce *EC-135* oraz *R44* są zagrożone wpadnięciem w pierścień wirowy podczas nagłego wtargnięcia w turbulencję przy ścianie budynku. Przesuwając wirnik w stronę centrum wiru, zmniejszamy to niebezpieczeństwo, jednakże w pewnej odległości od ściany trafiamy na sile duszenie, które również może być niebezpieczne dla lotu ze względu na niedobory mocy niezbędnej do lotu. Analizy wykonane na modelach 2D i 3D wskazują, że opisane wyżej niebezpieczeństwo może się pojawić przy prędkości napływającego wiatru z prędkością od 7 m/s wzwyż, co jest bardzo dużym zakresem prędkości.

Podczas analiz turbulencji wywołanej pożarem można stwierdzić, że zagrożenie dla śmigłowców takich jak *EC-135*, jak również lżejszych zależy od wielkości pożaru. Analiza pożaru znacznego obszaru budynku potwierdziła obawy iż taki zawis może być ryzykowny nawet dla cięższego śmigłowca *W3A*. Ten sam przypadek niebezpieczeństwa, czyli pierścień wirowy, może wystąpić podczas nagłego wtargnięcia w turbulencję wywołaną pożarem otwartej przestrzeni. Jest to obszar szczególnie niebezpiecznych lotów. Zawis nad palącym się małym obszarem lub samochodem nie stwarza zagrożenia dla śmigłowca zarówno lekkiego jak i ciężkich.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bramwell A. R. S.: *Helicopter Dynamics*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2001.
- [2] Bukowski J.: *Mechanika płynów*, PWN, 1971.
- [3] Elsner J. W.: *Turbulencja przepływów*, PWN, Warszawa, 1987.
- [4] Juriew B. N.: *Aerodinamiczeskij raszczet wiertoletow*, Obarangiz, Moskwa, 1956.
- [5] Źródła internetowe.

MATEUSZ KANIA

INFLUENCE OF TURBULENT FLOW NEAR BUILDINGS AND FIRES ON HELICOPTER FLIGHTS SAFETY

Summary

In this paper present influence of turbulent flow near buildings and fires on helicopter flights safety. All analysis were made on CFD software Ansys Fluent™. Present all treats during helicopters flights in turbulence flow on low altitudes in this environment. Analysis were made based on four helicopters: Eurocopter EC-135, Eurocopter EC-145, PZL W3A „Sokół” and Robinson R44.