

Artykuł został przetłumaczony na język angielski na podstawie zadania finansowanego w ramach umowy nr 873/P-DUN/2019 ze środków Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego przeznaczonych na działalność upowszechniającą naukę – stworzenie anglojęzycznych wersji wydawanych publikacji. **Jego oficjalną wersją jest wersja anglojęzyczna.** Niniejszy plik jest pierwotną wersją autorską po recenzjach, bez weryfikacji językowej i składu komputerowego.

Aleksander OLEJNIK, Piotr ZALEWSKI

## **Samoloty Su-22 oraz MiG-29 jako platformy do wynoszenia rakiet z ładunkiem kosmicznym<sup>1</sup>**

*Aleksander OLEJNIK, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki Uzbrojenia i Lotnictwa, e-mail: aleksander.olejnik@wat.edu.pl, ORCID ID: 0000-0003-2354-0782*

*Piotr ZALEWSKI, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki Uzbrojenia i Lotnictwa, e-mail: piotr.zalewski@wat.edu.pl, ORCID ID: 0000-0002-3834-5376*

**Abstrakt.** Praca jest komunikatem dotyczącym stanu realizacji projektu badawczego. W opracowaniu zaprezentowano wyniki analizy obszaru badawczego projektu. Na tej podstawie dokonano wyboru platformy-nosiciela rakiety kosmicznej. Dwustopniowy system do wynoszenia mikrosatelity bazuje na zaadaptowanym samolocie bojowym przenoszącym raketę z ładunkiem satelitarnym, która odstrzeliwana jest na maksymalnie osiąganą wysokość. Jako potencjalną platformę transportową wytypowano dwa wycofywane ze służby bojowe samoloty naddźwiękowe: MiG-29 oraz Su-22. Wybrana raketa z ładunkiem misyjnym ma być przenoszona pod kadłubem. Wstępne analizy wykazały, że wskazane samoloty przy zaproponowanym profilu misji z powodzeniem wykonają zadanie wyniesienia hipotetycznej rakiety z ładunkiem użytecznym o masie co najmniej 10 kg na niską orbitę okołozemską. Potwierdziło to zasadność podstawowej tezy projektu badawczego. Dla potrzeb analizy własności aeromechanicznych zestawu opracowano zarówno modele cyfrowe 3D do symulacji komputerowych, jak i fizyczne modele skalowane do badań tunelowych. Do odwzorowania geometrii samolotów wykorzystano skanery laserowe, a pomiary wykonano na egzemplarzach samolotów Su-22 oraz MiG-29 znajdujących się w zasobach bazy laboratoryjnej Instytutu Techniki Lotniczej WML WAT. Wykorzystując trójwymiarowe modele skalowane

---

<sup>1</sup> Praca jest efektem realizacji etapu projektu badawczego Grant Badawczy MON nr 13-989/2018/WAT pt. *Lotniczo-rakietowy system wynoszenia ładunków na niską orbitę okołozemską – studium realizowalności*, finansowanego ze środków Ministerstwa Obrony Narodowej, a wykonywanego w Wojskowej Akademii Technicznej od 2018 r.

wygenerowane w środowisku CAD, wydrukowano fizyczne modele bryłowe do badań w tunelu aerodynamicznym. Wstępne symulacje komputerowe przeprowadzone w systemie ANSYS Fluent nie wykazały negatywnego wpływu rakiety kosmicznej na charakterystyki aerodynamiczne i stateczność samolotu-nosiciela.

Słowa kluczowe: zestaw lotniczo-rakietowy, samolot-platforma, mikrosatelita

## 1. Wprowadzenie

W trakcie minionych 20 lat w literaturze związanej z tzw. komercyjną eksploracją przestrzeni kosmicznej można było znaleźć liczne opracowania dotyczące lotniczo-rakietowego systemu wynoszenia obiektów kosmicznych [1-10]. Istotą tego systemu jest wykorzystanie samolotu w charakterze nosiciela do wynoszenia oraz platformy startowej do wystrzeliwania rakiety kosmicznej (rys. 1). Rozwiązanie to stanowi alternatywę dla tradycyjnego systemu wynoszenia ładunków w przestrzeń kosmiczną przy pomocy rakiet nośnych odpalanych z powierzchni ziemi (lądu lub oceanu). Systemy te ze względu na ograniczony udźwig samolotu (np. w porównaniu do udźwigu rakiet nośnych typu Falcon-9 czy Delta IV), który stanowi naturalne ograniczenie masy ładunku użytecznego do kilkudziesięciu czy kilkuset kilogramów, są rozważane jako alternatywne, zdolne do wynoszenia mikro- lub minisatelitów na niską orbitę okołozemską – z ang. *Low Earth Orbit* (w skrócie LEO).

W nawiązaniu do omawianej koncepcji od 2018 r. w Wojskowej Akademii Technicznej jest realizowany grant badawczy pt. *Lotniczo-rakietowy system wynoszenia ładunków na niską orbitę okołozemską – studium realizowalności*, a jego celem jest wykazanie, czy w warunkach krajowych, opierając się na rodzimym zapleczu naukowo-badawczym i technologicznym, taki system jest możliwy do zaprojektowania i zbudowania.

## 2. Analiza obszaru badawczego

Pierwszym etapem projektu była analiza obszaru badawczego, czyli ocena stanu technologii na podstawie zebranej literatury. Z jej analizy wynika, że rozważano niemal 140 projektów systemów lotniczo-rakietowych, co więcej w ostatnim czasie (kilku lat) jest analizowanych

wiele nowych [5]. Najstarszym systemem, do tego jedynym operacyjnym, jest Stargazer-Pegasus firmy Orbital ATK opracowany w latach 90. ubiegłego wieku (rys. 1) [8]. Przy pomocy tego zestawu (zmodyfikowany samolot pasażerski Lockheed Tri Star i odpalana spod jego kadłuba trójstopniowa rakiet kosmiczna Pegasus XL o masie całkowitej 23130 kg) wynoszony jest ładunek kosmiczny o łącznej masie do 443 kg. Do końca 2020 roku wykonano 44 operacje wyniesienia obiektów na niską orbitę okołoziemską (LEO). Nad podobnym systemem pracuje firma Virgin Orbit. 18.01.2021 r. dokonano drugiej, tym razem udanej próby systemu odpalenia rakiety spod kadłuba samolotu Boeing 747 (rys. 2). Silniki rakiety odpalanej 25.05.2020 r. nie pracowały poprawnie i raketę utracono.

W 2006 roku firma Boeing zaprezentowała [1] koncepcję wynoszenia rakiety z ładunkiem kosmicznym na grzbiecie naddźwiękowego samolotu bojowego Boeing F-15E, jako systemu alternatywnego (ang. *Responsive Air Launch*) do „klasycznego” (rys. 2). Zmodernizowana rakiet opracowana na bazie przywoływanego Pegasus o masie ok. 15 000 kg miała przenosić ładunek użyteczny o masie do 300 kg (około 2% całkowitej masy rakiety). Był to punkt zwrotny w rozwoju technologii, gdyż w kolejnych latach pojawiły się analogiczne projekty, w których do wynoszenia raket kosmicznych proponowano wycofane z użytkowania samoloty naddźwiękowe: np. F-16, F-15 czy rosyjskie MiG-29 oraz MiG-31 [3-9]. W ostatnim czasie powstały start-upy, które szukają inwestorów do finansowania programów, jednym z nich jest hiszpański Celestia Aerospace [10], który zakłada użycie do roli nosiciela-platformy samolotu MiG-29.



Rys. 1. Z lewej: system Stargazer-Pegasus firmy Orbital ATK, z prawej: LauncherOne firmy Virgin Orbital



Rys. 2. Ewolucja konfiguracji zestawów lotniczo-rakietowych firmy Boeing, z lewej: F-15 Global Strike Eagle z rakieta na kadłubie, z prawej: F-15E ALASA z rakieta pod kadłubem

W literaturze systemy te są klasyfikowane jako tzw. *Responsive Space Assets*<sup>2</sup>, czyli alternatywne do tradycyjnych systemy wynoszenia obiektów kosmicznych (nano- lub mikrosatelitów), tj. nisko-kosztowe, niezawodne, dostępne i mobilne. W tym kontekście należy rozumieć systemy niewymagające rozbudowanej i stałej infrastruktury naziemnej do startu i kontroli rakiet kosmicznych. Funkcję platformy startowej pełni statek powietrzny przenoszący rakieta. Takie rozwiązanie gwarantuje dużą elastyczność i mobilność, dzięki czemu obiekt może zostać wyniesiony na orbitę o dowolnej inklinacji. Użytkowanie lotniczo-rakietowych systemów oznacza też niezależność od warunków pogodowych. Istotna jest sprawa bezpieczeństwa, naziemne systemy wymagają wytyczenia specjalnych niezamieszkałych stref bezpieczeństwa (lokalizacja JFK Space Center czy Bajkonuru). W krajowych czy europejskich warunkach jest to niemal niemożliwe, aktualnie Norwegia posiada, a w zasadzie buduje „poligon rakietowy” (*spaceport*) na wyspie Andoya, podobny projekt ma powstać w Kirunie w Szwecji.

Proponowany system zapewnia „niezależność” od dostawcy usługi. Wprawdzie na rynku pojawiły się firmy prywatne świadczące usługi komercyjne (np. SpaceX), ale są one nadal zależne od infrastruktury rządowej (jak dotąd rakiety SpaceX Falcon operują z JFK Space Center). Co więcej, w przypadku „usług militarnych” firma, jak każda amerykańska, musi mieć zgodę Kongresu USA. SpaceX przy pomocy rakiet Falcon wynosi ładunki orbitalne o masie do niemal 10 ton. W tym wypadku klient „mniejszy”, z małym ładunkiem musi czekać na duży

---

<sup>2</sup> Definicja to została sformułowana na 4. konferencji nt. *Responsive Space*, Los Angeles, CA, 2006 r.

transport albo do czasu, gdy firma „zapełni” ładownie, więc nie jest to *Responsive Space Assets*. Także profil misji czy docelowa orbita są zdefiniowane przez „zasadniczego” kontrahenta.

Co najważniejsze, system może wykorzystywać po niezbędnych modyfikacjach istniejące konstrukcje lotnicze, w tym dostępne naddźwiękowe samoloty bojowe wycofywane z użytkowania w lotnictwie wojskowym. Aktualnie samoloty tzw. czwartej generacji są powszechnie wycofywane (Su-22, MiG-29, F-15 czy starsze wersje F-16). W naszym przypadku samoloty Su-22 oraz MiG-29 wkrótce będą wycofywane z lotnictwa Sił Zbrojnych RP, a rodzimy przemysł i zaplecze naukowo-techniczne ma potencjał i doświadczenie w remoncie i modernizacji wymienionych statków powietrznych. Wynikiem analizy obszaru badawczego była aktualizacja harmonogramu projektu badawczego i rozszerzenie zakresu badań o samolot Su-22.

### **3. Konfiguracja zestawu lotniczo-rakietowego**

Jako nosiciela-platformę do prowadzenia operacji kosmicznych wybrano eksploatowane w lotnictwie wojskowym wersje samolotów bojowych Su-22M4 oraz MiG-29A. W tabeli 1 zestawiono podstawowe dane i osiągi wymienionych statków powietrznych. Posiadają one naddźwiękową prędkość lotu i pułap operacyjny ponad 15 000 m, odpowiednio duży, aby rozważać wyniesienie rakiety z ładunkiem satelitarnym jako koncepcję opłacalną. MiG-29 dysponuje zdecydowanie większą prędkością maksymalną, zasięg samolotów jest porównywalny. Mniejszym udźwigiem charakteryzuje się rodzima wersja MiG-29A – około 2000 kg. W tym kontekście samolot Su-22M4 z udźwigiem dwukrotnie większym posiada większy potencjał. Co więcej w przypadku ładunku umieszczonego pod kadłubem (rakietą podwieszoną) tzw. prześwit, czyli odległość skrajnie dolnego punktu rakiety od płaszczyzny kołowania, jest znacznie większy niż w przypadku MiG-29. W tym ostatnim zbiornik paliwa jest umieszczony pomiędzy gondolami silników, a podwozie jest relatywnie niższe, co warunkuje możliwość podwieszenia rakiety o znacznie mniejszej średnicy. Należy przyjąć, że dla potrzeb programu kosmicznego pewna część wyposażenia samolotów będzie zbędna. Zasadniczo można rozważyć usunięcie elementów bojowych wchodzących w skład lotniczych systemów pokładowych, tzn.: radiolokatora, dalmierza laserowego, urządzeń celowniczych, działka pokładowego, podwieszanych stanowisk uzbrojeniowych, urządzeń walki radiolokacyjnej itp. Wstępnie można oszacować masę ww. urządzeń na około 1000 kg, niemniej trzeba pamiętać o wędrówce środka masy i zmianie wyważenia, to samo dotyczy

umieszczenia rakiety kosmicznej. Dla różnych konfiguracji masowych o określonej lokalizacji środka masy konieczne jest przeprowadzenie analizy stateczności w locie.

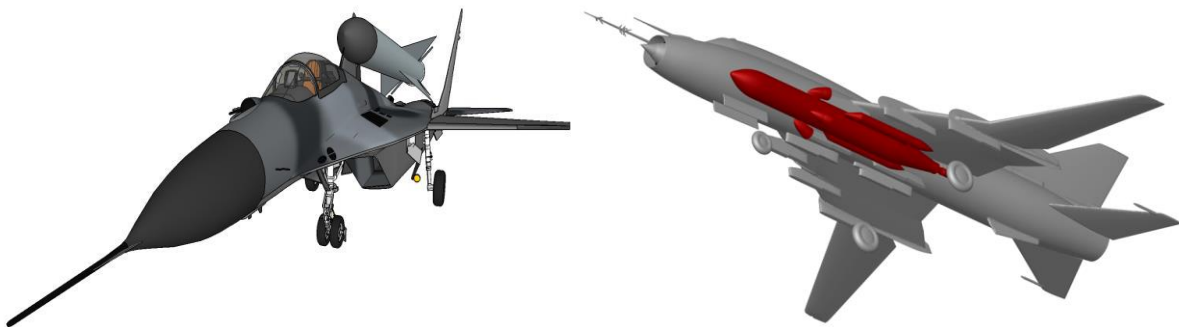
Tabela 1. Podstawowe parametry i osiągi samolotów Su-22 M4 oraz MiG-29A

samolot/ parametr	MiG-29A	Su-22M4
Udźwig użyteczny [kg]	2000	4500
Prędkość maksymalna [Ma]	2,30	1,70
Pułap operacyjny [m]	17500	15200
Zasięg bez zbiorników dodatkowych [km]	1750	1500
Liczba egzemplarzy aktualnie w eksploatacji	29	12

Kolejnym zagadnieniem jest skonfigurowanie systemu do realizacji misji. Firma Boeing zaproponowała przenoszenie rakiety na grzbiecie F-15E, pomiędzy podwójnym usterzeniem pionowym. Taką konfigurację można by przyjąć dla samolotu MiG-29, natomiast w przypadku Su-22 jego pojedyncze usterzenie wyklucza ten wariant. Analizy wskazały, że transport rakiety na kadłubie wiąże się ze znacznym ryzykiem. W przypadku nieprawidłowego zrzutu ładunku może on uderzyć w statecznik pionowy. Ze względu na umieszczenie rakiety pomiędzy statecznikami pionowymi w zasadzie nie można wykonać jej awaryjnego zrzutu. W przypadku awarii samolotu czy utraty możliwości odpalenia rakiety załoga musi lądować w konfiguracji z dodatkową masą na grzbiecie. Przeciążony w ten sposób samolot będzie charakteryzował się dużą prędkością lądowania, a w przypadku ciekłego paliwa raketowego dochodzi niebezpieczeństwo zapłonu i eksplozji. Powstaje także problem z bezpiecznym katapultowaniem pilota – fotel katapultowy może uderzyć w raketę kosmiczną, która w tej konfiguracji jest umieszczona tuż za jego kabiną. Oprócz tych zagrożeń mogą się pojawić problemy ze statecznością kierunkową samolotu, wywołane interferencją opływu rakiety i stateczników pionowych oraz generowaniem przez raketę drgań typu buffeting usterzenia pionowego. Prawdopodobnie powyższe argumenty spowodowały, że w kolejnym programie z wykorzystaniem samolotu F-15E w roli nosiciela firma Boeing umieściła raketę pod jego kadłubem (rys. 2). Konfiguracja misji z raketą wynoszącą ładunek orbitalny zamocowaną pod kadłubem wydaje się znacznie bezpieczniejsza. W przypadku zastosowania samolotów bojowych jest możliwość wykorzystania klasycznych belek uzbrojenia oraz wręg kadłubowych do mocowania ładunku, co w konsekwencji nie wymaga ingerencji w strukturę siłową i wykonania modernizacji konstrukcji płatowca. Natomiast zasadniczym ograniczeniem jest

wymóg zachowania minimalnego prześwitu pomiędzy płatowcem a pasem startowym (czyli wysokość podwozia). Jest on znacznie większy w Su-22 niż w przypadku MiG-29. Alternatywą dla obu konstrukcji MiG-29 i Su-22 jest zaprojektowanie nowego podwozia, ale to są już zmiany w strukturze siłowej płatowca i wymagają uruchomienia cyklu skomplikowanych i długotrwałych prób laboratoryjnych, testów eksploatacyjnych i czynności niezbędnych do certyfikowania zmian konstrukcji.

W konsekwencji dla MiG-29 przyjęto umieszczenie ładunku w miejscu dodatkowego zbiornika paliwa – przy zastosowaniu specjalnego adaptera. Element ten zapewnia obniżenie zawieszenia rakiety, która wystaje wtedy poza obrys samolotu. Takie rozwiązanie umożliwia podwieszenie elementu o średnicy przekraczającej 300 mm. Niestety ograniczeniem jest „prześwit”, który dla takiej konfiguracji jest niewielki i wiąże się z ryzykiem uderzenia obiektu o nawierzchnię podczas startu samolotu. Dla Su-22 obliczenia wykonano przy założeniu, że rakietę będzie przenoszona centralnie pod kadłubem lub pod skrzydłem (rys. 3). W tym drugim przypadku „prześwit” jest znacznie większy, ale taki wariant będzie wykazywał asymetrię masy i geometrii, co w konsekwencji skutkuje koniecznością permanentnego korygowania trajektorii lotu przez pilota.



Rys. 3. Opracowane dla potrzeb projektu modele zestawów: MiG-29 z rakietą kosmiczną na „grzbiecie” (rosyjski pocisk przeciwlotniczy 5W28) oraz Su-22 z rakietą (DARPA ALASA) pod skrzydłem

Osobnym zagadnieniem jest analiza rakiety kosmicznej i jej potencjału. W pierwotnym projekcie Boeing [1] F-15E miał przenosić raketę Boeing Global Strike Missile (OSC Minotaur 3) o masie 15 000 kg z ładunkiem kosmicznym o masie do 300 kg (rys. 2). W kolejnym

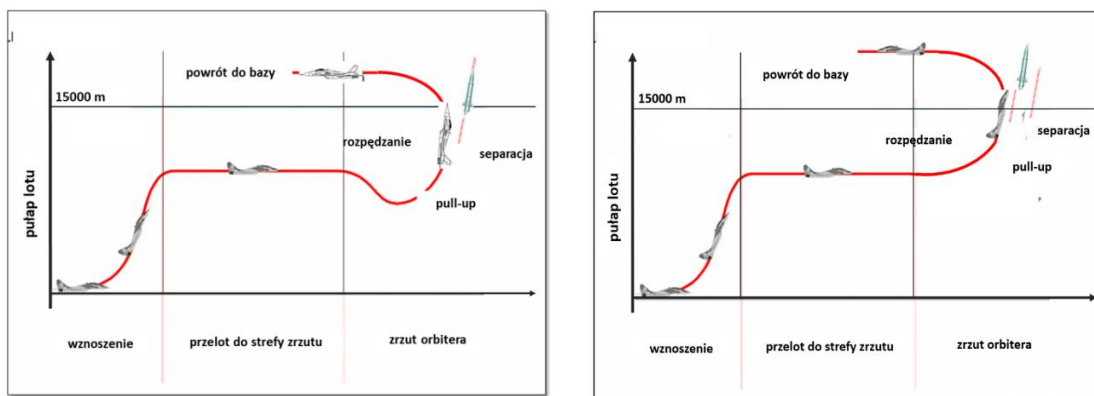
projekcie, tym razem pod kadłubem F-15E, raketę ALASA<sup>3</sup> o masie ok. 4 000 kg z ładunkiem kosmicznym ok. 45 kg (rys. 2). W Holandii Nationaal Lucht-en Ruimtevaartlaboratorium [5] prowadzi podobne studium, którego celem jest opracowanie Affordable Launch Opportunities for Small Satellites, czyli systemu wynoszenia mikrosatelitów przez m.in. wycofywany z eksploatacji samolot F-16. Analizy wykazały, że samolot ten jest zdolny wystrzelić raketę kosmiczną o masę całkowitą 930 kg, z ładunkiem użytecznym ok. 10 kg, na orbitę LEO do wysokości ok. 500 km. Z obliczeń wynika, że raketa powinna być odrzucana na wysokości 15 000 m z prędkością początkową (nosiciela) 250 m/s, przy kącie zrzutu-wznoszenia samolotu 50°. Pierwszy cytowany przypadek rakiety OSC Minotaur jest poza możliwościami samolotów MiG-29 oraz Su-22, ale już w przypadku dwóch następnych rakiet rodzime samoloty dysponują odpowiednimi osiągnięciami (pułap, prędkość lotu oraz udźwig).

Parametrami kluczowymi decydującymi o efektywności systemu wynoszenia obiektów kosmicznych przy pomocy platform lotniczych są: prędkość nosiciela w momencie zrzutu ładunku i jest to (niemal jednocześnie) prędkość początkowa rakiety kosmicznej, pułap lotu nosiciela oraz kąt nachylenia trajektorii lotu samolotu w momencie zrzutu, będący kątem startu rakiety kosmicznej. Do realizacji zadania zaproponowano profil misji pokazany na rys. 4, gdzie aby zwiększyć pułap i prędkość lotu, wykorzystywany jest tzw. pułap energetyczny. Pułap energetyczny (inna nazwa dynamiczny, kinetyczny, balistyczny) to wysokość osiągnięta przez statek powietrzny dzięki wykorzystaniu zapasu energii kinetycznej w locie poziomym. Po osiągnięciu maksymalnej wysokości, na której samolot może kontynuować długotrwały lot, pilot w locie poziomym przyspiesza do maksymalnej możliwej prędkości. Następnie wykonuje gwałtowne wznoszenie, tym samym samolot zyskuje dodatkową energię potencjalną (wysokości) kosztem wytracanej stopniowo energii kinetycznej (prędkość maleje). W literaturze angielskojęzycznej manewr ten jest określany jako *zoom climb*. W czasie tego manewru można uzyskać optymalny kąt zrzutu rakiety, gdyż samolot wykonuje połowę pętli i zawraca, oddalając się od rakiety. Jest to istotne, gdyż w przypadku awarii czy eksplozji rakiety samolot pozostaje w bezpiecznej odległości od zdarzenia.

---

<sup>3</sup> Airborne Launch Assist Space Access, w skrócie ALASA, to dwustopniowa raketa kosmiczna zaprojektowana przez Boeing oraz Orbital ATK (program: Stargazer-Pegasus). Miała być wynoszona pod kadłubem samolotu F-15E. Niestety podczas dwóch kolejnych prób naziemnych silnika rakiety w 2015 r. paliwo (silnie niestabilne) eksplodowało i program czasowo wstrzymano. W 2018 roku firma Orbital ATK ogłosiła, że dalej samodzielnie sfinansuje program rozwojowy paliwa i silnika.





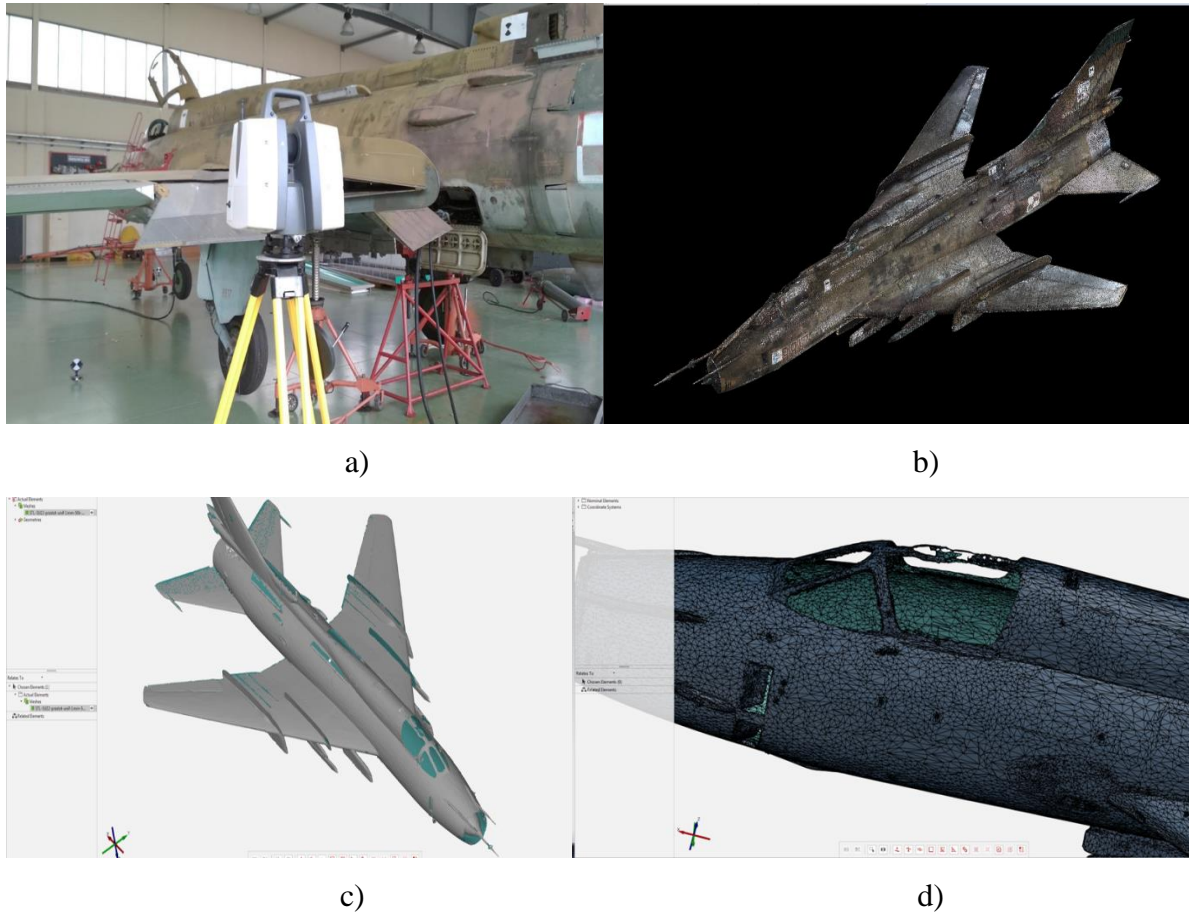
Rys. 4. Rozpatrywane profile misji samolotu bojowego jako lotniczo-rakietowego systemu do wnoszenia ładunków, z lewej: z rakieta na grzbiecie samolotu (MiG-29), z prawej: pod kadłubem (MiG-29 oraz Su-22)

Dla proponowanego profilu misji i konfiguracji zestawów samolotów MiG-29 oraz Su-22 z rakieta o masie całkowitej 930 kg (wariant „holenderski” [5]) wykonano bilans zużycia paliwa. Z obliczeń wynika, że do jej wykonania wystarczy paliwo w zbiornikach integralnych, z czego około 40% paliwa nie zostanie w ogóle zużyte. W konsekwencji profil misji może ulec modyfikacji. Pozostałe paliwo pozwoli na zwiększenie zasięgu samolotu w razie konieczności lądowania w miejscu oddalonym od lotniska startowego. W przypadku prowadzenia operacji nad Bałtykiem dysponujemy lotniskami wzdłuż linii wybrzeża (Miroslawiec, Świdwin, Zegrze Pomorskie, Debrno, Babie Doły). Wykorzystanie w misji tylko części paliwa umożliwiłoby też zastosowanie cięższej rakiety o większym udźwigu użytecznym.

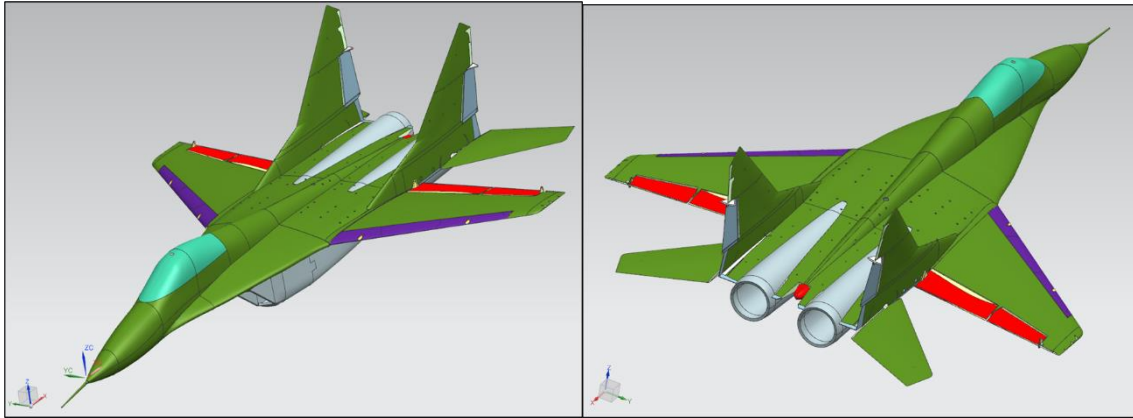
#### 4. Numeryczne i eksperymentalne modele zestawu

Kolejnym zadaniem było opracowanie modeli cyfrowych (3D) do analiz i symulacji numerycznych oraz skalowanych do badań tunelowych dla obu rozpatrywanych samolotów. Modele brył płatowców zbudowano, odwzorowując wymiary rzeczywistych samolotów. W tym celu wykorzystano skaner laserowy firmy Leica model ScanStation P30 wraz z oprogramowaniem. Wynikiem skanowania była tzw. chmura punktów, na podstawie której technikami aproksymacyjnymi wygenerowano powierzchnie odwzorowywanych pokryć płatowca (rys. 5 i 6). Wykorzystując modele cyfrowe, „wydrukowano” na drukarkach skalowane modele (w skali 1:13 oraz 1:15) do badań w tunelu aerodynamicznym (rys. 7). Większość elementów modeli została wydrukowana w technologii FDM (*Fused Deposition*

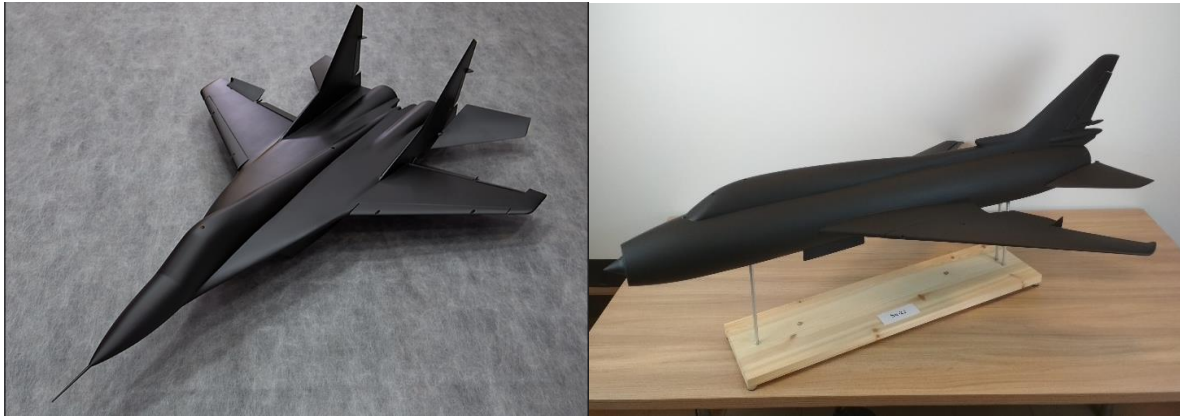
*Modeling*), gdzie detale są budowane poprzez nanoszenie warstwa po warstwie roztopionego „filamentu” tworzywa sztucznego, spajając je w ten sposób z poprzednimi warstwami detalu, aż do uzyskania pełnej wysokości modelu. Następnie elementy połączono w całość, dokonano korekt połączeń oraz pomalowano ich zewnętrzne powierzchnie.



Rys. 5. Etapy tworzenia modelu cyfrowego samolotu Su-22: a) skaner Leica ScanStation P30 oraz samolot Su-22 w hangarze WAT podczas pomiarów, b) „chmura punktów” z pomiarów samolotu Su-22, c) model „mesh” samolotu, d) model powierzchniowy STP

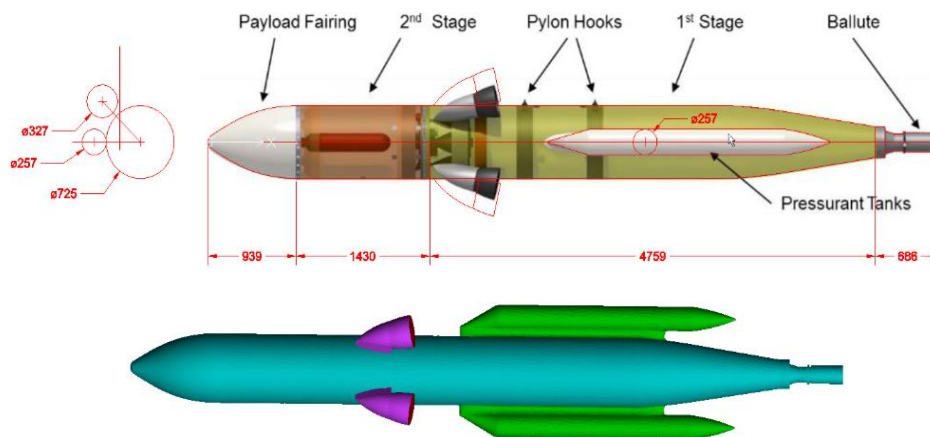


Rys. 6. Cyfrowy model geometryczny samolotu MiG-29



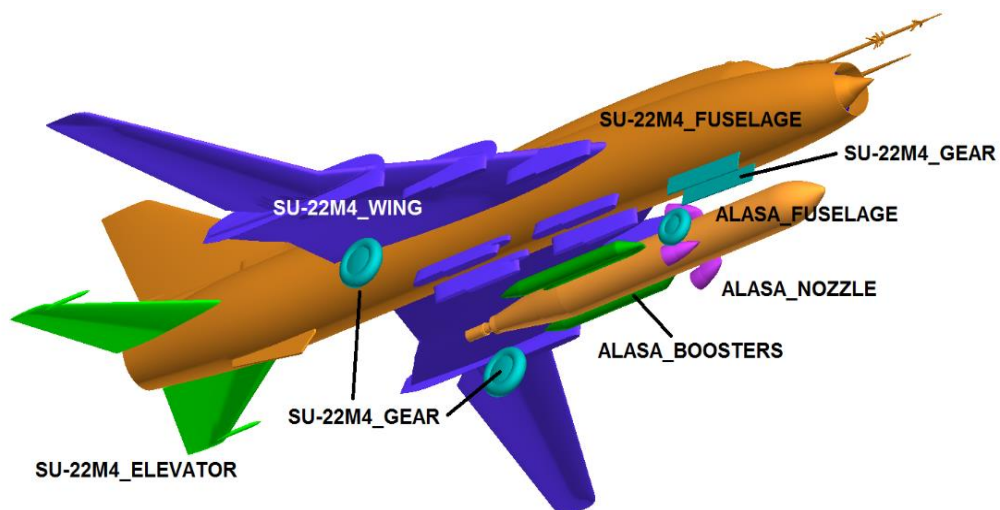
Rys. 7. Modele samolotów MiG-29 oraz Su-22 do badań tunelowych

Modele cyfrowe rakiet kosmicznych opracowano na podstawie danych oraz rysunków rzeczywistych konstrukcji. Wykonano m.in. model rakiety kosmicznej programu DARPA ALASA (rys. 8), wciąż użytkowanego w kraju pocisku przeciwlotniczego systemu S-200 czy S-75 (W-755) produkcji radzieckiej. Na potrzeby aerodynamicznych badań tunelowych modele rakiet zostaną „wydrukowane” w takiej samej technologii jak modele samolotów.

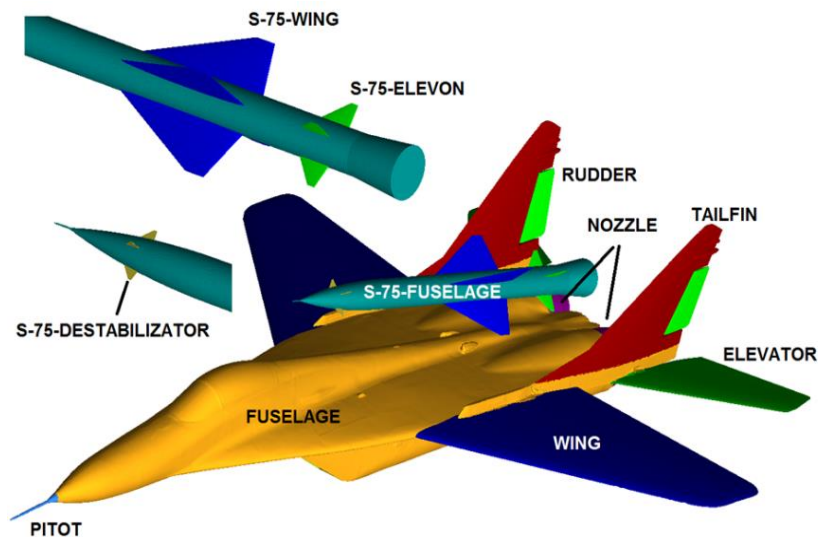


Rys. 8. Rakieta DARPA ALASA – podstawowe wymiary i model CAD odwzorowanej bryły

W celu umożliwienia analizy wpływu poszczególnych zespołów konstrukcyjnych samolotu na uzyskiwane charakterystyki aerodynamiczne opracowane modele obliczeniowe samolotu i rakiety podzielono na odpowiednie obszary (rys. 9 i 10). W skład obszarów obliczeniowych wchodzi: kadłub, skrzydła, usterzenie poziome, podwozie oraz rakieta systemu wynoszenia ładunków na LEO. Analiza aerodynamiczna przygotowanego w ten sposób modelu umożliwia prezentację graficzną uzyskanych wyników w postaci oddzielnych charakterystyk obrazujących efekty z poszczególnych separowanych komponentów modelowych.



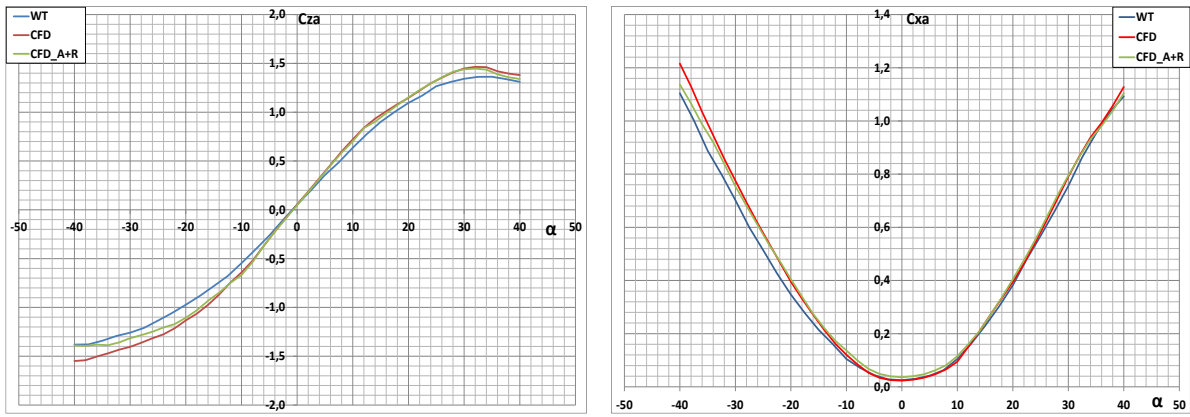
Rys. 9. Podział bryły aerodynamicznej samolotu Su-22 (z rakieta ALASA) na obszary obliczeniowe



Rys. 10. Podział bryły aerodynamicznej samolotu MiG-29 (z rakieta S-75) na obszary obliczeniowe

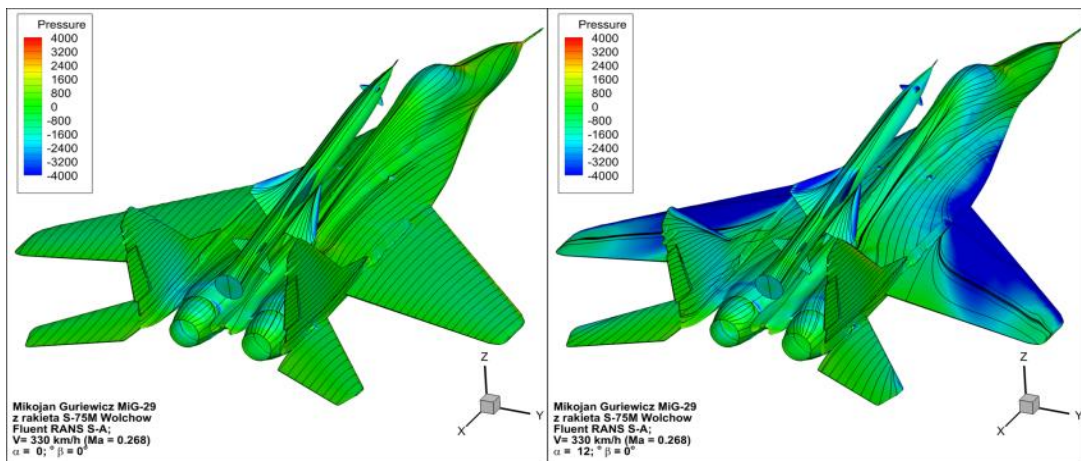
### 5. Symulacje i analizy numeryczne aerodynamiki zestawu

Dla obu zaprezentowanych wariantów modelowych przeprowadzono serię obliczeń numerycznych dla różnych prędkości lotu oraz kątów natarcia. Wyniki wykazały, że zespół zachowuje w sposób zadowalający stateczność podłużną oraz dobre charakterystyki przeciągnięcia dla wysokich kątów natarcia w całym badanym zakresie, a wpływ prędkości jest niższy od tego wywołanego samą obecnością rakiety. Wyniki zaprezentowano w formie wykresów charakterystyk aerodynamicznych i kolorowych map rozkładu parametrów w polu przepływu na powierzchniach badanych brył uzupełnionych o obraz linii prądu. Na rysunkach 11-12 pokazano przykładowe wyniki dla zestawu MiG-29 z rakieta S-75 przenoszona na grzbiecie (w późniejszych analizach ten wariant nie był już uwzględniany), natomiast na rysunkach 13-14 Su-22 w konfiguracji gładkiej oraz w konfiguracji z rakieta systemu wynoszenia ładunków na LEO. Symulacje wykonano za pomocą uznanego za standard w przemyśle oprogramowania do analiz przepływu ANSYS Fluent. Z analizy otrzymanych wyników obliczeń wynika, że wpływ rakiety na zmianę obliczeniowych charakterystyk aerodynamicznych samolotu jest znikomy, a także obecność przenoszonej rakiety nie wpływa znacząco na obraz pola przepływu na płatowcu samolotu.



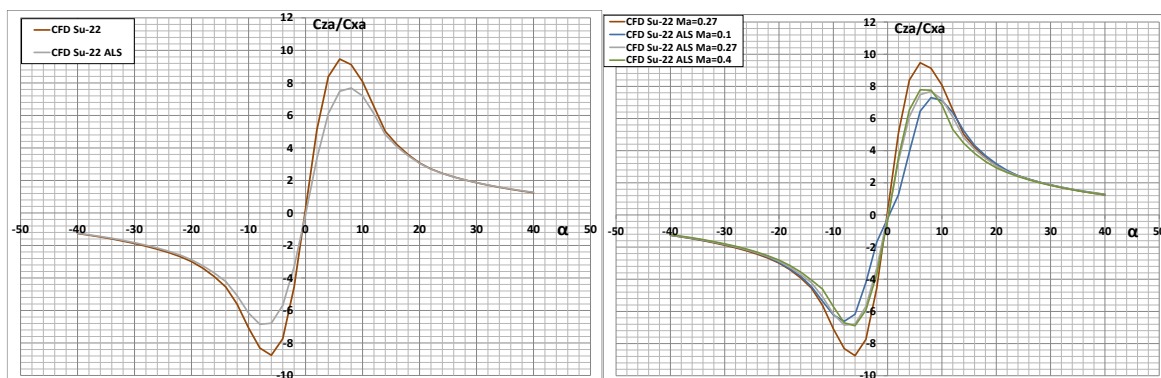
Rys. 11. MiG-29, porównanie podstawowych charakterystyk aerodynamicznych: z lewej – współczynnika siły nośnej  $C_z(\alpha)$ , z prawej – współczynnika siły oporu  $C_x(\alpha)$  dla samolotu MiG-29 z rakietą (CFD\_A+R) i bez rakiety S-75 (CFD)

7

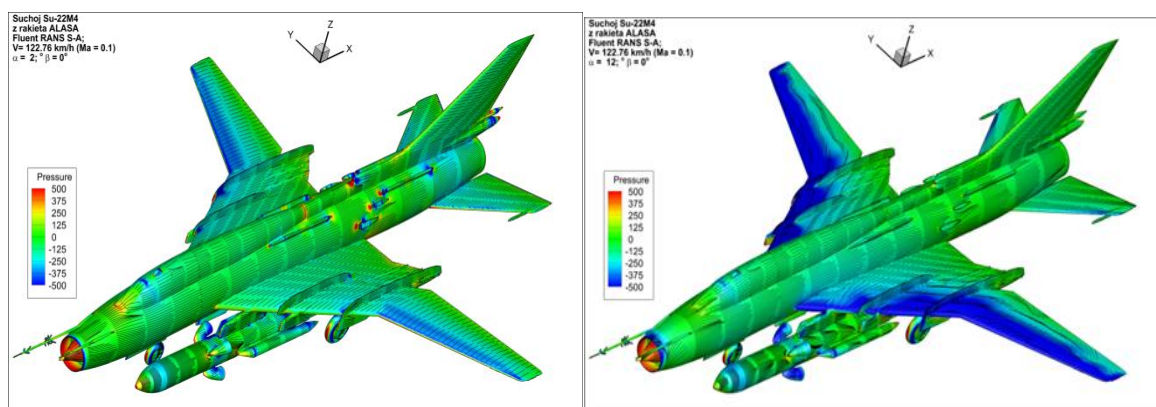


Rys. 12. Rozkłady ciśnienia statycznego na powierzchni płatowca samolotu MiG-29 w konfiguracji z nawieszoną rakietą S-75 dla różnych wartości kąta natarcia  $\alpha$ , odpowiednio:

$0^\circ$ ,  $12^\circ$



Rys. 13. Su-22, porównanie doskonałości aerodynamicznej w funkcji kąta natarcia dla samolotu Su-22 w konfiguracji gładkiej (CFD Su-22) i z rakiętą ALASA (CFD Su-22 ALS) – z lewej, z prawej – uzyskanych dla różnych prędkości lotu



Rys. 14. Porównanie zmian rozkładu ciśnienia oraz przebiegu linii prądu na powierzchni samolotu Su-22 w konfiguracji z podwieszoną rakiętą ALASA i dla kąta natarcia  $\alpha = 0^\circ$  oraz  $12^\circ$

## 6. Wnioski i rekomendacje dalszych badań

W wyniku analizy obszaru badawczego nie tylko zaktualizowano harmonogram realizacji projektu badawczego, ale przede wszystkim uwzględniono samolot Su-22 jako potencjalną platformę. W dalszej części zadania zostaną wykonane równoległe dwie analizy dla samolotu MiG-29 oraz Su-22 jako platformy startowej dla rakiety z ładunkiem kosmicznym. Samoloty te wkrótce zostaną wycofane z eksploatacji, a rodzimy przemysł (Wojskowe Zakłady Lotnicze Polskiej Grupy Zbrojeniowej) ma odpowiednie kompetencje do wykonania ich modernizacji

pod kątem potrzeb programu kosmicznego. W konsekwencji lotniczo-rakietowy zestaw może stać się narodowym odpowiednikiem Responsive Space Assets.

Ze względów bezpieczeństwa konfiguracja samolotu i rakiety pod kadłubem jest rozwiązaniem do zaakceptowania, natomiast zaniechano dalszych analiz nad ładunkiem umieszczonym na grzbiecie MiG-29. W rozpatrywanej konfiguracji samoloty MiG-29 oraz Su-22 z powodzeniem wykonają postawione im zadanie wyniesienia rakiety o masie obliczeniowej 930 kg z użytecznym ładunkiem kosmicznym 10 kg, czyli co najmniej nanosatelitę, pod kadłubem lub skrzydłem samolotu.

Zebrane doświadczenie oraz zakupiony skaner laserowy wraz z oprogramowaniem umożliwiły odtworzenie brył samolotów i budowę modeli obliczeniowych zestawów lotniczo-rakietowych. To samo można powiedzieć o drukarkach 3D w kontekście skalowanych modeli do badań tunelowych. Jeszcze kilka lat temu modele wykonywano ręcznie z drewna lub metalu, co więcej istniała specjalna modelarnia, a samo tworzenie modelu obiektu trwało kilka lub kilkanaście tygodni.

Wyniki wstępnych symulacji komputerowych modeli zestawów lotniczo-rakietowych wskazują, że stosując metody numerycznej mechaniki płynów, można efektywnie wyznaczyć charakterystyki aerodynamiczne wysoko manewrowych samolotów bojowych z nietypowym „kosmicznym” ładunkiem. Z analizy wyników obliczeń wynika, że wpływ rakiety na zmianę charakterystyk aerodynamicznych samolotu jest znikomy, także obecność przenoszonej rakiety nie wpływa znacząco na obraz pola przepływu na płatowcu samolotu. Dalsze szczegółowe wyniki analiz własności aeromechanicznych zestawów będą prowadzone w kolejnych etapach projektu badawczego.

Stworzone dla potrzeb symulacji komputerowych modele powierzchniowe samolotów zostały wykorzystane do opracowania skalowanych modeli do badań eksperymentalnych. W ten sposób symulacje i analizy numeryczne zostaną zweryfikowane badaniami eksperymentalnymi zestawów w tunelu aerodynamicznym Instytutu Techniki Lotniczej na Wydziale Mechatroniki, Lotnictwa i Uzbrojenia WAT.

Ponadto zostaną wykonane analizy dotyczące „zredukowania” masy własnej samolotów, opracowania projektu stanowiska do przenoszenia rakiety oraz samej rakiety kosmicznej czy różnych scenariuszy misji (np. wybór bazy lotniczej, strefy zrzutu rakiety kosmicznej itp.).

Olejnik Aleksander <https://orcid.org/0000-0003-2354-0782>

Zalewski Piotr <https://orcid.org/0000-0002-3834-5376>



## LITERATURA

- [1] CHEN T., FERGUSON P.W., DEAMER D.A., HENSLEY J.: *Responsive Air Launch F-15 Global Strike Eagle*, AIAA – Proceedings of 4th Responsive Space Conference, AIAA RS4-2006-2001, 2006.
- [2] BARTOLOTTA P.A.: *Horizontal Launch: Versatile Concept for Assured Space Access*, NASA, SP 2011-215994, 2011.
- [3] CLARKE J.P., CERVEN K., MARCH J., OLSZEWSKI M., WHEATON B., WILLIAMS M., YU J., SELIG M., LOTH E., BURTON R.: *Conceptual Design of a Supersonic Air-launch System*, Proceedings of 43<sup>rd</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit AIAA 2007-584, 2007.
- [4] DARPA: *Report on Horizontal Launch Study*, 2011.
- [5] KESTEREN M.W.: *Air Launch versus Ground Launch: a Multidisciplinary Design Optimization Study of Expendable Launch Vehicles on Cost and Performance*, Faculty of Aerospace Engineering, Delft University of Technology, Netherlands, 2013.
- [6] NIEDERSTRASSER C.: *Small Launch Vehicles – A 2018 State of the Industry Survey*, Proceedings of 32<sup>nd</sup> Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2018.
- [7] LOPATA J., RUTAN B.: *RASCAL: A Demonstration of Operationally Responsive Space Launch*, AIAA-Proceedings of 2<sup>nd</sup> Responsive Space Conference RS2-2004-8004, 2004.
- [8] Orbital ATK: *Pegasus User's Guide*, 2015.
- [9] SMOLYAKOV A.V., YANAKAEV V.A., KORNEV A.V., SHEVKO S.V.: "MARKS" *Small Aviation-Rocket Space Launch System*, Journal of Engineering Science and Technology Vol. 13, No. 5 (2018), 1143-1152, School of Engineering, Taylor's University, 2018.
- [10] GARCIA-CUADRADO G.: *Nanosatellites – The Tool for a New Economy of Space: Opening Space Frontiers to a Wider Audience*, Journal of Aeronautics & Aerospace 2017, Volume 6, Issue 2 1000192, 2017.

- [11] OLEJNIK A., DOBRZYŃSKI P., MACHOWSKI B., ZALEWSKI P.: *Concept of Airborne Rocket System of Mini- and Micro-satellites Launching*, Mechanik No. 7/2018, PL ISSN 0025-6552, pp. 511-513, 2018.
- [12] OLEJNIK A., KISZKOWIAK L., DZIUBIŃSKI A., ZALEWSKI P., MACHOWSKI B., DOBRZYŃSKI P., *Analiza aerodynamiczna samolotu odrzutowego pod kątem wykorzystania do wynoszenia mini- i mikrosatelitów*, Nasze Stulecie, Nauka dla Obronności, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, s. 407-423, 2018.
- [13] OLEJNIK A., DOBRZYŃSKI P., MACHOWSKI B., ZALEWSKI P., *Aspekty bezpieczeństwa lotniczo-rakietowego systemu wynoszenia nano- i mikrosatelitów*, materiały konferencji „Wyzwania i rozwój obrony powietrznej Rzeczypospolitej Polskiej. Obronność RP XXI wieku”, Dęblin, s. 291-306, 2018.
- [14] Wojskowa Akademia Techniczna, sprawozdania etapowe z realizacji projektu badawczego Grant badawczy nr 13-989/2018/WAT pt. *Lotniczo-rakietowy system wynoszenia ładunków na niską orbitę okołoziemską – studium realizowalności*, Warszawa, 2019.
- [15] OLEJNIK A., BORCUCH D., MILCZARCZYK J., RADOMSKI M., ZALEWSKI P., *Model powierzchniowy samolotu odrzutowego w kontekście badań systemu wynoszenia mini- i mikrosatelitów*, Nauka dla Obronności i Środowiska, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, Tom 2, s. 149-160, 2020.
- [16] OLEJNIK A., ZALEWSKI P., *Lotniczo-rakietowy system wynoszenia ładunków kosmicznych jako Responsive Space Assets Sił Zbrojnych RP*, Nauka dla Obronności i Środowiska, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, Tom 2, s. 162-173, 2020.

### **Su-22 and MiG-29 aircraft as air-launch platforms for space rockets**

**Abstract.** The work is an announcement on the current state of the research project implementation. The study presents the results of an analysis of the project's research area. On this basis, the two-stage micro-satellite launch system was selected. The system, a space-kit is based on an adopted combat aircraft carrying a satellite-laden rocket that is fired at the maximum altitude. As a potential transport platform, two withdrawn supersonic aircraft were selected: the MiG-29 and the Su-22. A dedicated mission-laden rocket is to be carried under

the fuselage. Preliminary analyses have shown that the aircraft indicated with the proposed mission profile will successfully carry out the task of launching a hypothetical rocket with a payload of at least 10 kg into low earth orbit. This confirmed the merits of the basic thesis of the research project. For the analysis of the aeromechanical properties of the kit, both 3D digital models for computer simulations and physical models scaled for tunnel tests were developed. Laser scanners were used to map aircraft geometry, and measurements were made on Su-22 and MiG-29 aircraft in the aviation laboratory of the Military University of Technology. Using three-dimensional scaled models generated in a CAD environment, physical solid models were printed for wind tunnel investigations. Preliminary computer simulations conducted in the ANSYS Fluent system did not point out any negative impact of the rocket on aerodynamic characteristics and stability of the both carrier aircraft.

**Keywords:** air-launch satellite system, air-launch platform, microsatellite