

TECHNIKA

lotnicza

i ASTRONAUTYCZNA

AVIATION AND SPACE TECHNOLOGY

1
2026



Od Redakcji

Drodzy Czytelnicy, witamy w kolejnym roku z „Techniką Lotniczą i Astronautyczną”. Z pewnością czekali Państwo niecierpliwie na ten numer, ale warto było, gdyż prezentowane tu artykuły niosą wiele ciekawych treści. Znajdą Państwo w numerze zarówno tematy historyczne, jak i zupełnie nowoczesne. Dzięki tekstowi prof. Pylaka prezentujemy sylwetkę słynnego profesora mechaniki, Maksymiliana Hubera, którego dokonania naukowe są silnie związane ze światem lotnictwa w XX w. Z drugiej strony prezentujemy trzy teksty autorstwa studentów, dotyczące tematów nowoczesnych technologii i innowacji. Jako że w br. byliśmy

świadkami pierwszej od lat wyprawy załogowej na Księżyc, nie mogło także zabraknąć działu związanego z astronautyką. Na kolejnych stronach znajdą Państwo dwa artykuły o tematyce związanej z myślą o podróżach poza ziemską orbitę. Na „plecach” okładki natomiast widnieje *Kermit*, dron, który będzie bohaterem kolejnego numeru „Techniki...”. Nie chcąc zdradzać szczegółów, zostaje mi zachęcić Państwa do lektury prezentowanych tekstów.

Elżbieta Nazaruk

Samolot z okładki

Polska w kosmosie – hasło znane sprzed lat nabiera nowego sensu i znaczenia. W dobie dynamicznej komercjalizacji okołoziemskiej przestrzeni kosmicznej, gdy kolejne państwa, a nawet prywatne przedsiębiorstwa, przełamują tradycyjną hegemonię amerykańskiej NASA i radzieckiego INTERKOSMOSU, obecność na orbicie nie jest już elitarnym wyczynem, a wręcz koniecznością, standardem w uprzemysłowionym kraju. Jak na tle innych wypada Polska? W podboju kosmosu można wyróżnić dwie zasadnicze drogi, mianowicie loty załogowe z uczestnictwem astronautów różnych narodowości oraz loty bezzałogowe, których głównym celem jest umieszczanie sztucznych satelitów Ziemi bądź eksploracja dalekiego kosmosu. Lot pierwszego polskiego kosmonauty był, jak większość działań lotniczo-astronautycznych w tamtych latach, motywowany politycznie. Mirosław Hermaszewski spędził na orbicie 8 dni, krążąc wokół Ziemi na pokładzie statku kosmicznego Sojuz 30, dowodzonego przez Rosjanina Piotra Klimuka. Ciekawostką jest fakt ustanowienia kilku rekordów Polski uznanych przez FAI, np. rekordu prędkości lotu wynoszącego 28 000 km/h czy rekordu przebytego dystansu w jednym locie – 5 273 257 km. 47 lat po spektakularnym sukcesie Hermaszewskiego, mamy wreszcie polskiego astronautę „nowożytnego”, Sławosza Uznańskiego-Wiśniewskiego. Wnioskując na podstawie doniesień medialnych i komentarzy, można odnieść wrażenie, że i tym razem wielka polityka miała znaczący wpływ na misję – zarówno na jej przebieg, jak i aktywności związane z wielopłaszczyznowym wykorzystaniem efektów wyczynu Polaka już po locie. Nie mamy własnych rakiet ani statków kosmicznych, nie mamy kosmodromu, więc jesteśmy zależni od innych. Stąd różne zawiłości i nie do końca korzystne zapisy umowy, w ramach której odbył się lot. Spójrzmy jednak bardziej optymistycznie.

Dzięki obecności Polski w międzynarodowych gremiach – politycznych i astronautycznych – mamy możliwość współpracy. Starajmy się więc wykorzystać ją jak najefektywniej.

Drugi front podboju kosmosu, loty bezzałogowe, dają nam większe szanse. O ile wysłanie człowieka w kosmos wymaga stosunkowo dużego i ciężkiego statku, ogromnej rakiety, a także spełnienia „kosmicznych” wymogów w zakresie bezpieczeństwa lotu, to umieszczenie niewielkiego satelity na orbicie nie jest aż tak trudne. W warunkach akademickich można tego próbować z dużym prawdopodobieństwem powodzenia w ramach programu CubeSat. Małe satelity o wymiarach sześcianu o krawędzi 10 cm są zabierane do ładowni rakiet komercyjnych jako ładunek uzupełniający do osiągnięcia masy dopuszczalnej. Jest to wielka szansa dla kół naukowych i uczelnianych zespołów badawczych dysponujących ograniczonymi środkami. Organizowane są konkursy, w których kryteriami oceny są innowacyjność oraz potencjalne wyniki eksperymentów z wykorzystaniem studenckich satelitów, projektowanych i realizowanych na uczelniach. Laureaci otrzymują darmowy wolny slot dla swojego mikrosatelity. Dla młodych akademików jest to niepowtarzalna szansa na wejście do elitarnej społeczności zdobywców kosmosu. Może więc lepiej podejmować taką pracę u podstaw, której celem jest motywowanie studentów do pracy nad mikrosatelitami niż czynić starania o kolejnego astronautę. Tym bardziej, że wysłanie człowieka w kosmos pociąga za sobą olbrzymie koszty. Typowy CubeSat, nawet wysłany w kosmos komercyjnie, to promil kosztów misji załogowej. A jeśli udałoby się zmotywować choćby połowę naszych uczelni technicznych, korzyści na rzecz gospodarki i nauki byłyby z pewnością dużo większe.

Jarosław Pytka

TECHNIKA lotnicza i ASTRONAUTYCZNA



POLITECHNIKA
LUBELSKA



WYDAWNICTWO
POLITECHNIKI
LUBELSKIEJ

Wydawca:

Politechnika Lubelska

ISSN: 2720-4340

e-ISSN: 2957-1049

Adres redakcji:

ul. Nadbystrzycka 36, pok. 604, 20-618 Lublin

Nakład: 100 egz.

Redaguje zespół:

Martyna Bawolska,
Ernest Gnapowski,
Jan Laskowski,
Tomasz Murawski,
Michał Ombach,

Redaktor naczelny

Jarosław Pytka, j.pytka@pollub.pl

Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej:

Elżbieta Nazaruk – redakcja i korekta językowa
Łukasz Maj – skład i łamanie

Rada programowa:

prof. dr hab. inż. Zbigniew Pater
(Rektor Politechniki Lubelskiej – przewodniczący)

Członkowie:

gen. bryg. w st. spocz. mgr inż. Ryszard Dębski
(Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Prezes Towarzystwa Polskich
Inżynierów Lotnictwa SIMP),
dr inż. Andrzej Glass (Redaktor Honorowy),
dr hab. inż. Andrzej Gontarz
(Politechnika Lubelska),
gen. broni pil. prof. dr hab. Jerzy Gotowala
(Akademia Sztuki Wojennej),
prof. Pablo Iscold
(Center of Aeronautical Studies, Federal University of Minas Gerais,
Pampulha, Brazylia),
prof. dr hab. inż. Marek Orkisz
(Politechnika Rzeszowska),
prof. Zbigniew Pater
(Politechnika Lubelska – Przewodniczący RP),
gen. bryg. pil. dr hab. Jan Rajchel
(Wyższa Szkoła Oficerska Sił Powietrznych w Dęblinie – obecnie Lotnicza
Akademia Wojskowa w Dęblinie),
dr hab. Paweł Soroka
(Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach),
dr inż. Marek Szumski
(Politechnika Rzeszowska),
prof. dr hab. inż. Romana Śliwa
(Politechnika Rzeszowska),
płk dr hab. inż. Adam Wetoszka
(Lotnicza Akademia Wojskowa w Dęblinie),
dr hab. inż. Kazimierz Zaleski
(Politechnika Lubelska, SIMP),
prof. dr hab. Józef Zając
(Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Chełmie)

Przedstawiciele przemysłu i przedsiębiorstw branży lotniczej:

dr inż. Paweł Chojnacki (Leonardo/PZL Świdnik),
mgr inż. Andrzej Farian (EXIN Sp. z o.o.),
mgr inż. Jerzy Krawczyk (EKOLOT),
dr inż. Tomasz Krysiński (Airbus Helicopters),
pil. mgr inż. Jacek Mainka (WIZZAIR),
mgr inż. Edward Margański (Zakłady Lotnicze Margański&Mysłowski S.A.)

Zamieszczone w numerze niepodpisane grafiki i tabele stanowią
opracowanie własne Autora danego artykułu.

Wskazówki dla Autorów:

1. Publikacja artykułu w TLiA jest bezpłatna.
2. Manuskrypt artykułu można przygotować w dowolnej formie, najlepiej w programie MS Word 2003 lub nowszym, nie ma nakazanego formatu tekstu. Grafiki powinny być dołączone jako osobne pliki wysokiej rozdzielczości. Należy pamiętać o podpisach oraz opisach alternatywnych do materiałów graficznych. Rysunki bądź tabele zaczerpnięte ze źródeł nienależących do Autora mogą być publikowane jedynie za pisemną zgodą właściciela praw autorskich, jeśli nie są one dostępne na wolnej licencji.
3. TLiA publikuje następujące rodzaje artykułów:
 - a) podlegające recenzji artykuły naukowe, w tym. standardowe, skrócone (tzw. noty techniczne lub inżynierskie), artykuły przeglądowe,
 - b) artykuły metodyczne, dydaktyczne, stanowiące opis z komentarzem do materiału dydaktycznego; do artykułów metodycznych, dydaktycznych można dołączać materiał uzupełniający w postaci np. prezentacji, filmów,
 - c) relacje, np. z konferencji, wystaw, konkursów, zawodów,
 - d) rozszerzone streszczenia prac dyplomowych, inżynierskich, magisterskich i doktorskich,
 - e) artykuły o popularnonaukowej treści technicznej, publikowane na prawach rękopisu.
4. Przygotowane artykuły można przysyłać za pośrednictwem platformy wydawniczej Lublin University of Technology Publishing House (LUT PH): <https://ph.pollub.pl/index.php/tlia/about/submissions>.

Informujemy potencjalnych Autorów, że LUT PH jest internetowym systemem redakcyjnym typu Open Journal Systems, który umożliwia dwustronną komunikację między redakcją a Autorem. Znajdują się tam również szczegółowe wytyczne dla Autorów.



Rysunek na s. 1. okładki: Martyna Bawolska

Spis treści

Falcon 9 – inżynieryjne arcydzieło współczesnej astronautyki	4
Na Marsa i... z powrotem	10
OSTIV 2026	16
Propfan – kompromis między silnikiem turbośmigłowym a turbowentylatorowym	18
Innowacje koncepcyjno-technologiczne w zakresie niewykrywalności współczesnych samolotów bojowych przez radar	22
Zdalna wieża kontroli ruchu lotniczego	27
Tematyka lotnicza w pracach M.T. Hubera (1872–1950)	30

Falcon 9 – inżynieryjne arcydzieło współczesnej astronautyki

Ernest Gnapowski

Wydział Matematyki i Informatyki Technicznej, Politechnika Lubelska w Lublinie

Streszczenie

W artykule przedstawiono rakietę nośną Falcon 9, zaprojektowaną i produkowaną przez firmę SpaceX. Uwzględniono szczególnie jej parametry techniczne oraz zastosowane rozwiązania. Opisano elementy składowe Falcona 9, skupiając się zwłaszcza na konstrukcji rakiety, obejmującej pierwszy i drugi stopień, a także na zastosowanych silnikach Merlin wraz z ich charakterystyką i osiągnięciami. W dalszej części artykułu przeanalizowano profile typowych misji realizowanych przy użyciu Falcona 9, zarówno w konfiguracji z załogowym statkiem Dragon, jak i w wersji transportowej dla satelitów i ładunków cargo. Przedstawiono również wybrane innowacyjne rozwiązania, m.in. odzyskiwanie pierwszego stopnia rakiety nośnej.

Słowa kluczowe: Falcon 9, rakietą nośną, SpaceX, Merlin

Wprowadzenie

Falcon 9 to rakietą nośną opracowaną przez amerykańską firmę SpaceX, która zrewolucjonizowała sektor kosmiczny dzięki innowacyjnemu podejściu do ponownego użycia elementów rakietowych. Po raz pierwszy wystartowała w 2010 r., jest obecnie najczęściej używaną rakietą orbitalną na świecie. Charakteryzuje się wysoką niezawodnością, niższymi kosztami wynoszenia ładunków oraz unikatowym systemem lądowania pierwszego stopnia. Na ryc. 1 przedstawiono Falcona 9 na stanowisku startowym z widoczną wieżą startową.

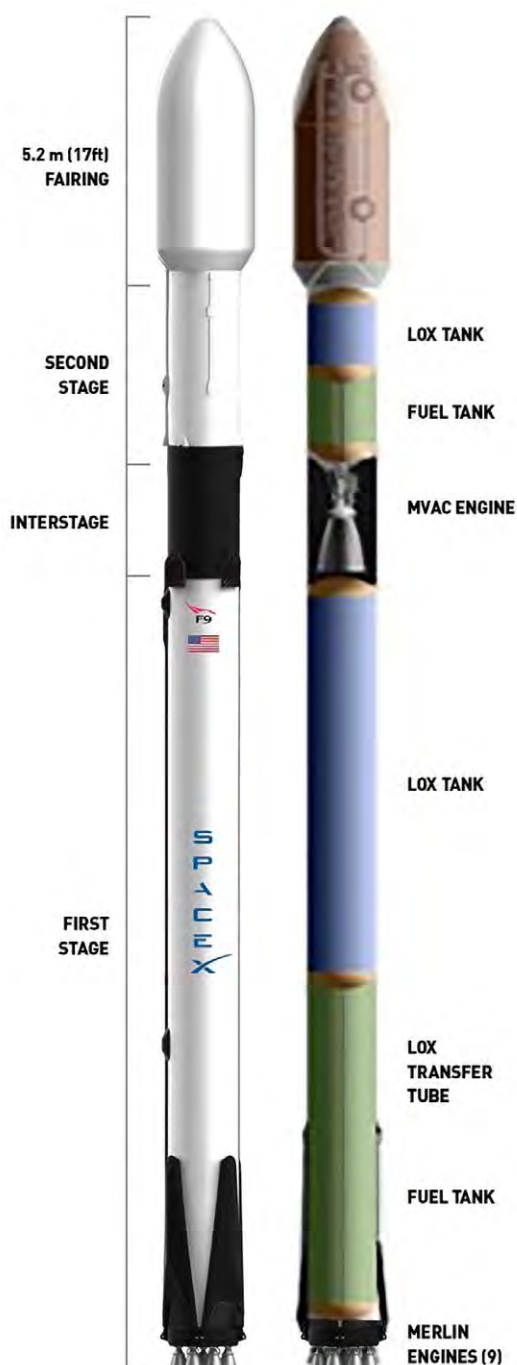
Budowa rakiety Falcon 9

Falcon 9 jest dwustopniową rakietą nośną o wysokości 70 m i średnicy 3,66 m. Główne moduły rakiety przedstawiono



Ryc. 1. Falcon 9 na stanowisku startowym z widoczną wieżą startową [1]

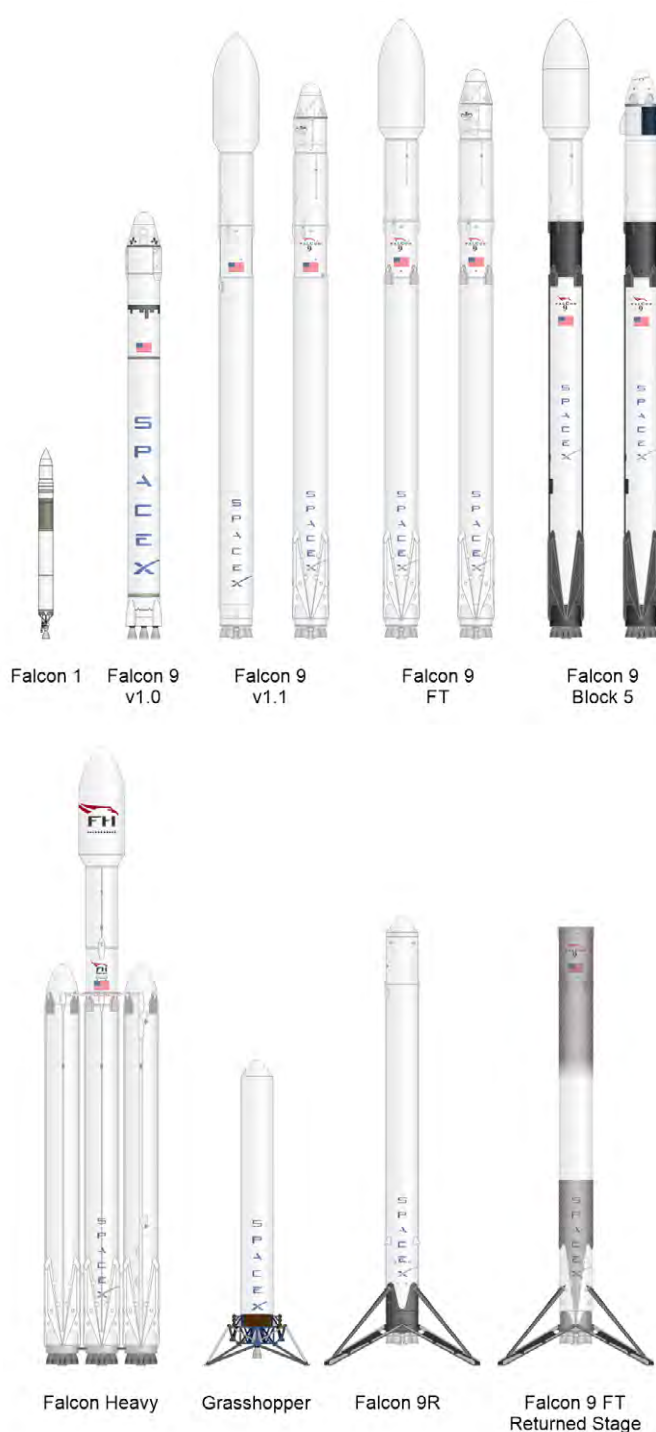
na ryc. 2. Pierwszy stopień jest wyposażony w dziewięć silników Merlin 1D i odpowiada za wyniesienie rakiety przez najgęstsze warstwy atmosfery. Drugi stopień, zasilany jednym silnikiem Merlin Vacuum (Merlin 1D w wersji przystosowanej do pracy w przestrzeni kosmicznej), odpowiedzialny jest za umieszczenie ładunku na docelowej orbicie. Kolejny moduł stanowi tzw. *interstage*, czyli element łączący oba stopnie rakiety, zawierający systemy separacyjne. Ostatni moduł stanowi osłona ładunku (*fairing*), która chroni go przed warunkami atmosferycznymi podczas startu.



Ryc. 2. Schemat rakiety Falcon 9 z opisem poszczególnych elementów [2]

Należy zaznaczyć, że istnieje kilka wersji Falcona 9. Od momentu swego debiutu w 2010 r. rakieta przeszła szereg modernizacji, które pokazano na ryc. 3. Najważniejsze wersje to:

- Falcon 9 v1.0 (2010–2013) – pierwsza generacja, z silnikami ułożonymi w układzie krzyżowym;
- Falcon 9 v1.1 (2013–2016) – większy ciąg, wydłużony pierwszy stopień;
- Falcon 9 Full Thrust (v1.2) – lepsze osiągi dzięki schłodzonemu paliwu;



Ryc. 3. Wersje rakiety Falcon 9 [3]

- Falcon 9 Block 5 (od 2018 r.) – finalna i obecnie używana wersja, zoptymalizowana pod kątem wielokrotnego użycia.

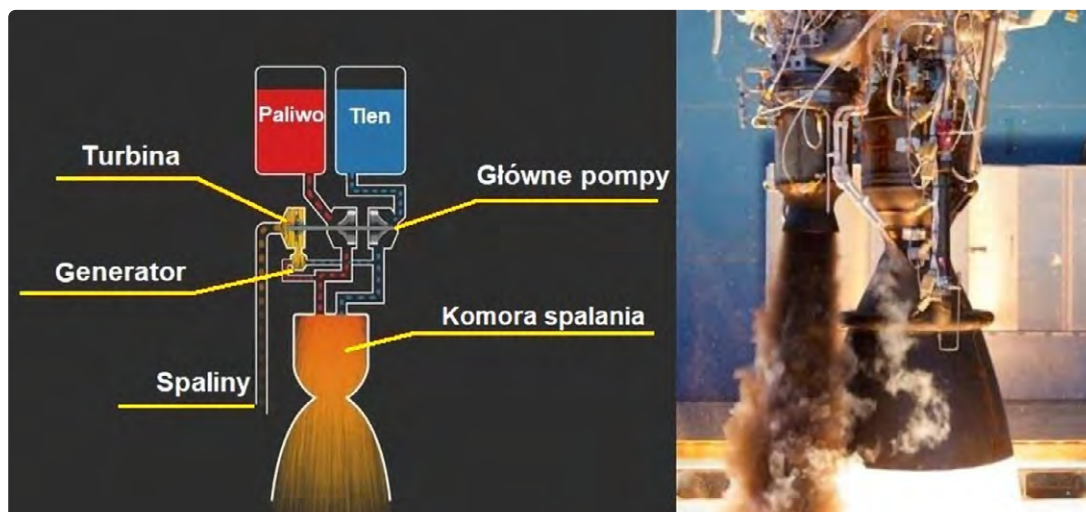
Napęd rakiety Falcon 9 stanowi zespół silników raketowych Merlin 1D na ciekłe paliwo, spalających RP-1 (oczyszczona nafta lotnicza) oraz ciekły tlen. Uproszczoną budowę wspomnianego silnika, wraz z porównaniem do rzeczywistego układu, pokazano na ryc. 4. W pierwszym stopniu znajduje się dziewięć silników Merlin 1D, natomiast drugi stopień korzysta z jednego silnika Merlin Vacuum – oba typy przedstawiono na ryc. 5.

Silniki Merlin wykorzystują cykl otwartego obiegu gazowego. W tym układzie część paliwa i utleniacza trafia do tzw. generatora gazu, gdzie ulega spaleniowi w sposób niepełny, tworząc gorące gazy, które następnie napędzają turbiny pomp paliwowych. Po napędzeniu turbin spaliny są wyrzucane na zewnątrz, a główne strumienie paliwa i utleniacza trafiają do komory spalania, tworząc ciąg niezbędny do startu rakiety.

Należy zauważyć, że dzięki zaawansowanej elektronice i systemom telemetrycznym każdy z silników jest indywidualnie monitorowany w czasie rzeczywistym, a komputer pokładowy może w razie potrzeby wyłączyć niesprawny silnik bez zagrożenia dla całej misji. Elastyczność i prostota konstrukcji Merlina sprawiają, że jest to jeden z najtańszych i najbardziej niezawodnych silników w swojej klasie.

Parametry techniczne napędu Falcon 9

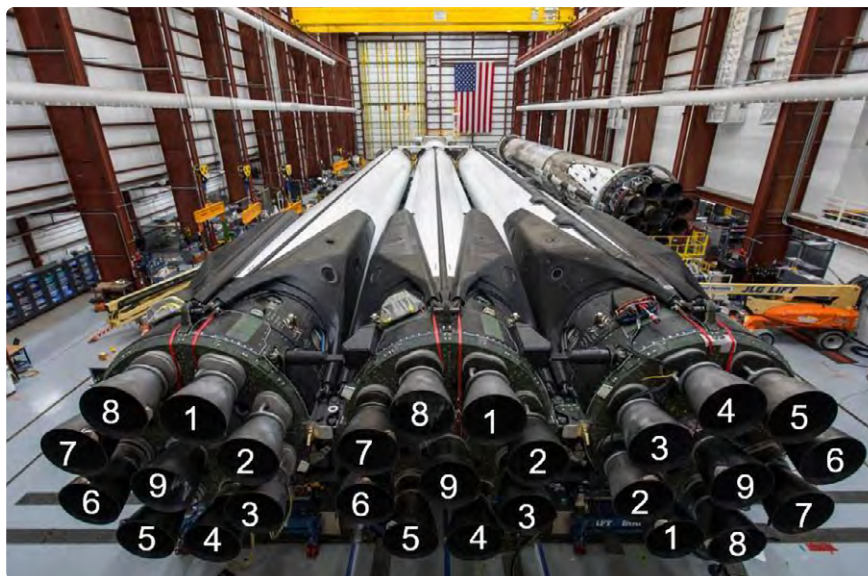
Zespół napędowy pierwszego stopnia składa się, w zależności od konfiguracji, z 9 do 27 silników Merlin 1D. Wersję pierwszego stopnia Falcon 9 Heavy wraz z konfiguracją silników pokazano na ryc. 6. Ciąg jednego silnika Merlin 1D wynosi 845 kN na poziomie morza, natomiast całkowity ciąg pierwszego stopnia waha się od 7600 kN do 22819 kN, w zależności od specyfikacji. Do lotu w przestrzeni kosmicznej używany jest drugi stopień rakiety nośnej, którego napęd



Ryc. 4. Schemat budowy silnika Merlin 1D oraz rzeczywisty silnik podczas pracy [4]



Ryc. 5. Silnik Merlin 1D oraz Merlin Vacuum z wyraźnie większą dyszą [4]



Ryc. 6. Widok pierwszego stopnia rakiety Falcon 9 Heavy [5]

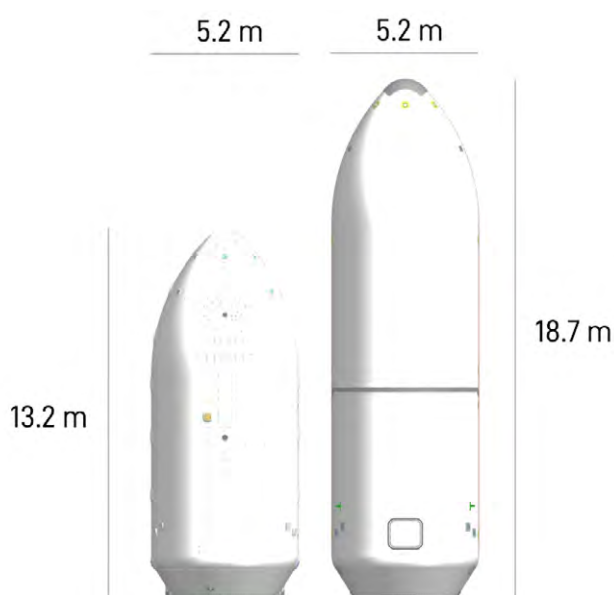
stanowi silnik Merlin Vacuum o ciągu około 981 kN w próżni.

Ważnymi parametrami są również zapas oraz zużycie paliwa niezbędne do pracy silników: dla pierwszego stopnia jest to około 385 000 l ciekłego tlenu i 147 000 l RP-1, natomiast dla drugiego stopnia jest to 90 000 l ciekłego tlenu i 35 000 l RP-1. Paliwo zużywane jest w ciągu około 2,5 minuty przez pierwszy stopień i około 6 minut przez drugi stopień. W komorze spalania silnika Merlin 1D panuje ciśnienie około 9,7 MPa, a sprawność turbopomp wynosi ponad 95%. Sterowanie ciągiem, jak wspomniano, odbywa się elektronicznie, natomiast sam proces chłodzenia komory realizowany jest poprzez przepływ paliwa przez jej ścianki. Należy nadmienić, że ważną cechą drugiego stopnia rakiety Falcon 9 (Merlin Vacuum) jest zdolność do wielokrotnego uruchamiania – wykorzystywana przy korektach orbitalnych.

Jednym z najważniejszych parametrów rakiet lecących w przestrzeń kosmiczną jest zdolność do zabierania ładunków. Falcon 9 w wersji Block 5 może wynieść do 22,8 tony na niską orbitę okołozemską (LEO od 200 do 2000 km nad powierzchnią Ziemi), do 8,3 tony na orbitę geostacjonarną (GTO, 35 786 km nad równikiem) oraz do ponad 4 ton na orbitę translunarną (jest to tor lotu statku kosmicznego, który przecina orbitę Księżyca, ale nie wchodzi na stałą orbitę okołoksiężycową). Na ryc. 7 przedstawiono wymiary standardowej i poszerzonej wersji osłon przestrzeni ładunkowej.

Rakieta Falcon 9 jest wykorzystywana w różnych profilach misji, m.in. do wynoszenia satelitów na orbitę LEO i GTO, lotów zaopatrzeniowych dla Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (ISS), załogowych lotów Crew Dragon oraz do misji eksploracyjnych, np. z sondami księżycowymi i marsjańskimi.

Należy wspomnieć o unikalnym rozwiązaniu stosowanym przez SpaceX w rakiecie Falcon 9, które pozwala na odzyskiwanie pierwszego stopnia rakiety przez jego „samodzielne” lądowanie, co znacząco redukuje koszty misji. Po separacji pierwszy stopień rozpoczyna serię manewrów, aby bezpiecznie powrócić na Ziemię. Przebieg lądowania rozpoczyna się od korekty trajektorii w stronę miejsca lądowania, następnie dochodzi do redukcji prędkości przed wejściem w gęste warstwy atmosfery i finalnego wyhamowania tuż przed przyziemieniem. Lądowanie może odbyć się na autonomicznej barce (ASDS) na oceanie lub na stanowisku lądowym. Na ryc. 8 przedstawiono lądowanie pierwszego stopnia rakiety Falcon 9.



Ryc. 7. Wymiary osłon przestrzeni ładunkowej [5]

Innowacyjne rozwiązania technologiczne

Jednym z najbardziej przełomowych rozwiązań zastosowanych w rakiecie Falcon 9 jest możliwość wielokrotnego użycia pierwszego stopnia. SpaceX jako pierwsza firma na świecie z powodzeniem opracowała i wdrożyła system



Ryc. 8. Lądowanie pierwszego stopnia Falcona 9 [6]

lądowania oraz ponownego wykorzystania tego segmentu rakiety, który jeszcze kilka lat temu był uznawany za jednorazowy. Kolejnymi innowacjami są m.in.: system siatki sterującej, wykonane z tytanu kratownice montowane w górnej części pierwszego stopnia (umożliwiają precyzyjne sterowanie kierunkiem lotu podczas schodzenia w atmosferze), autonomiczne barki lądowania (ASDS), które są bezzałogowymi platformami oceanicznymi umożliwiającymi odzysk pierwszego stopnia przy misjach, w których niemożliwe jest lądowanie na lądzie. Ponadto Falcon 9 korzysta z zaawansowanego oprogramowania do kontroli trajektorii i samodzielnego podejmowania decyzji na podstawie danych z czujników. Ważną innowacją jest również modułowa konstrukcja, która pozwala na szybsze przygotowanie do kolejnych misji i łatwiejszą integrację z różnymi typami ładunków.

Podsumowanie

Rakieta Falcon 9 to kamień milowy w dziejach astronautyki, łączący niezawodność z innowacjami. Zdolność do wielokrotnego użycia pierwszego stopnia oraz uniwersalność

zastosowań czynią tę raketę fundamentem obecnych i przyszłych misji SpaceX, w tym ambitnych planów eksploracji Księżyca i Marsa. Innowacyjne technologie, takie jak lądowanie na autonomicznych barkach, wyznaczają nowe standardy w budowie i eksploatacji rakiet nośnych XXI w.

Bibliografia:

- [1] <https://dzienniknaukowy.pl/niekontrolowane-wejscie-w-atmosfere-nad-terytorium-polski-szczatkow-rakiety-falcon-9> [dostęp: 02.09.2025].
- [2] <https://web.mit.edu/2.70/Reading%20Materials/SpaceX%20Falcon-users-guide-2021-09.pdf>. [dostęp: 02.09.2025].
- [3] https://historicspacecraft.com/Rockets_SpaceX.html [dostęp: 02.09.2025].
- [4] <https://www.wevolver.com/specs/merlin-engine-merlin-1d-falcon-9-falcon-heavy> [dostęp: 02.09.2025].
- [5] <https://www.spacex.com/assets/media/falcon-users-guide-2025-05-09.pdf> [dostęp: 02.09.2025].
- [6] <https://spacex.com.pl/wiadomosci/start-rakiety-falcon-9-z-misja-starlink-29> [dostęp: 02.09.2025].

Aktualne i archiwalne numery
TECHNIKI LOTNICZEJ I ASTRONAUTYCZNEJ
znajdziesz na platformie czasopism Wydawnictwa Politechniki Lubelskiej

TECHNIKA
lotnicza
i ASTRONAUTYCZNA
AVIATION AND SPACE TECHNOLOGY



zeskanuj i wejdź

Na Marsa i... z powrotem

Janusz Osarczuk

Instytut Astronomiczny Uniwersytetu Wrocławskiego (współpracownik)

Marek Halembert

Streszczenie

Powodzenie załogowej wyprawy marsjańskiej będzie w dużym stopniu zależać od sposobu jej przygotowania. Oczywiście już dziś można wsiąść do jednego z istniejących statków kosmicznych i dolecieć nim na Czerwoną Planetę. Chodzi jednak o to, by dotrzeć tam w tak dobrej kondycji zdrowotnej, by być zdolnym do powrotu na Ziemię. Dokonanie tego będzie możliwe tylko po rozwiązaniu najważniejszych problemów medycznych, które niewątpliwie pojawią się podczas tak długiej podróży.

Słowa kluczowe: Mars, lot załogowy, misja międzyplanetarna, medycyna kosmiczna

Wstęp

Podróż na Marsa od zawsze stanowiła ekscytujący temat. W ostatnim czasie zainteresowanie nim bardzo wzrosło, a stało się tak głównie za sprawą rozwoju technologii i pojawienia się nowoczesnych, dużych rakiet oraz statków kosmicznych. Co prawda, najbliższym celem ludzkości jest powrót na Księżyc, ale ma on być tylko przystankiem w drodze na Czerwoną Planetę.

To, że eksploracja planet rozpocznie się od Marsa, to pewnik. Jest on sąsiadem Ziemi, a oprócz tego jedyną poza nią planetą, która znajduje się w ekosferze Słońca (jest to obszar wokół naszej gwiazdy – na powierzchni planety lub naturalnego satelity – gdzie panują odpowiednie warunki do istnienia wody w stanie ciekłym). Spośród wszystkich planet Układu Słonecznego warunki panujące na Marsie są najbardziej zbliżone do ziemskich.

Warunki na Marsie

Na Marsie jest zimno, przy czym temperatura może oscylować od około -143°C na biegunach (zimą) do $+35^{\circ}\text{C}$ w rejonach równikowych (w południe). Jednak nawet w najcieplejszych miejscach dodatnie temperatury pojawiają się jedynie na chwilę.

Powyższe wartości są wynikiem niskiego ciśnienia atmosferycznego (ok. 636 Pa), bardzo cienkiej atmosfery oraz braku oceanów, które mogłyby stabilizować klimat. Atmosfera Czerwonej Planety składa się głównie z dwutlenku węgla, a jej niewielka grubość nie zapewnia skutecznej ochrony przed promieniowaniem kosmicznym.

Woda na Marsie nie występuje dziś w stanie ciekłym na powierzchni, ale jej obecność jest dobrze udokumentowana

w postaci lodu. Znajduje się on głównie w czapach polarnych, a także – jak wskazują pomiary radarowe – w postaci zamrożonej wody ukrytej pod powierzchnią gruntu, zwłaszcza na wyższych szerokościach geograficznych.

Powierzchnia Marsa przypomina ogromną, zimną pustynię. Niemal cała planeta pokryta jest drobnym pyłem i piaskiem bogatym w tlenki żelaza, które nadają jej charakterystyczny czerwony kolor. Opady wody nie występują, a wiatr odgrywa istotną rolę w kształtowaniu krajobrazu, tworząc wydmy i rozległe równiny pyłowe.

Czerwona Planeta, w przeciwieństwie do Ziemi, nie ma globalnego pola magnetycznego. Zamiast tego występują jedynie lokalne, szczątkowe pola magnetyczne zachowane we fragmentach skorupy. Brak magnetosfery sprawia, że atmosfera planety jest bezpośrednio wystawiona na działanie wiatru słonecznego, który przez miliardy lat stopniowo „zdmuchiwał” ją w przestrzeń kosmiczną. Oprócz cienkiej atmosfery jest to druga przyczyna, dla której natężenie promieniowania kosmicznego na powierzchni Marsa jest kilkukrotnie wyższe niż na Ziemi.

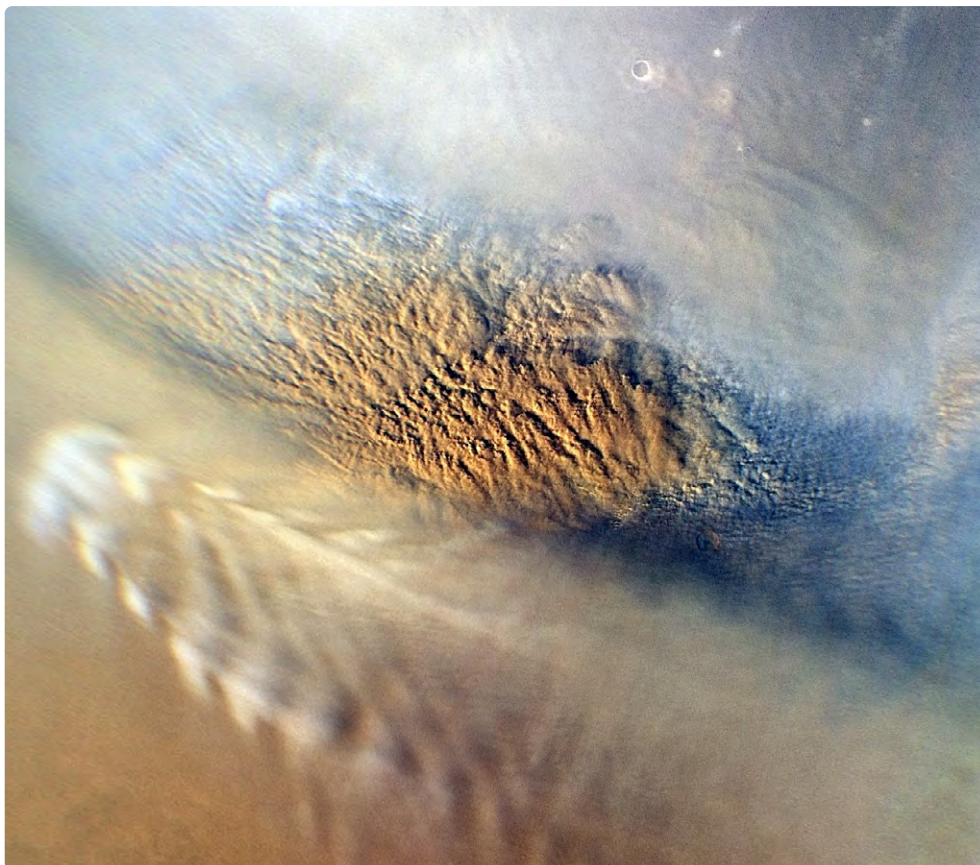
Regolit

Regolit marsjański, czyli warstwa luźnego materiału pokrywającego lite skały, jest jednym z najbardziej charakterystycznych elementów powierzchni planety. Składa się z drobnego pyłu, piasku oraz pokruszonych skał, powstałych w wyniku miliardów lat uderzeń meteorytów i powolnego wietrzenia. Pył ten jest łatwo unoszony przez wiatr.

Ważnym problemem jest elektrostatyczność marsjańskiego regolitu. W suchym środowisku, przy silnym promieniowaniu słonecznym i braku gęstej atmosfery, naelektryzowany pył silnie przylega do skafandrów, paneli słonecznych, kamer i radiatorów, a jego usuwanie jest bardzo trudne.

Regolit „wciska się wszędzie”, jego drobne cząstki są w stanie przenikać przez najmniejsze szczeliny, osiadać na uszczelnieniach i dostawać się do wnętrza urządzeń, a potencjalnie także do przyszłych habitatów. Może to prowadzić do awarii systemów technicznych, pogorszenia jakości powietrza wewnątrz baz oraz zwiększonego ryzyka zdrowotnego dla ludzi.

Istotną cechą marsjańskiego gruntu jest obecność nadchloranów, czyli związków chemicznych zawierających chlor i tlen. Są one toksyczne dla organizmów żywych i utrudniają bezpośrednie wykorzystanie marsjańskiej gleby do uprawy roślin. Jednocześnie związki te mają zdolność obniżania



Ryc. 1. Burza piaskowa na Marsie (źródło: <https://science.nasa.gov/resource/martian-dust-storm/>)

temperatury zamarzania wody, co rodzi pytania o możliwość istnienia krótkotrwałych, silnie zasolonych roztworów pod powierzchnią gruntu.

Mars słynie również z potężnych burz pyłowych (patrz ryc. 1). Regolit łatwo ulega unoszeniu, tworząc lokalne, regionalne, a czasem nawet globalne „huragany”, które potrafią objąć całą planetę na wiele tygodni. Burze te znacząco ograniczają widoczność, zmieniają bilans cieplny planety i stanowią poważne zagrożenie dla misji opartych na energii słonecznej.

Misje marsjańskie

Misje na Marsa rozpoczęły się na początku lat 60. XX w., w okresie intensywnej rywalizacji kosmicznej. W 1960 r. Związek Radziecki podjął pierwsze próby wysłania sond w kierunku Czerwonej Planety, jednak zakończyły się one niepowodzeniem. Pierwszym w pełni udanym przełotem była amerykańska misja sondy Mariner 4 z 1965 r., która przesała na Ziemię pierwsze zdjęcia marsjańskiej powierzchni. Od tego momentu Mars stał się jednym z głównych celów badań planetarnych.

Zakres badań dotychczasowych marsjańskich misji był bardzo szeroki. Obejmował analizę atmosfery, pomiary temperatury i ciśnienia, badania składu chemicznego gruntu, poszukiwanie wody oraz śladów dawnego lub obecnego życia. Orbitery mapowały powierzchnię z dużą rozdzielczością, lądowniki prowadziły pomiary *in situ*, a łaziki badały skały,

osady i strukturę regolitu. Coraz większą rolę zaczęły też odgrywać badania przygotowujące przyszłe misje załogowe.

Do najważniejszych osiągnięć należą misje Viking 1 i Viking 2, które wylądowały na Marsie w 1976 r. Były to pierwsze udane lądowania i jednocześnie pierwsze eksperymenty biologiczne przeprowadzone bezpośrednio na powierzchni innej planety. Choć nie potwierdziły istnienia życia, dostarczyły bezcennych danych o chemii gruntu i warunkach środowiskowych. Przełomowe były także odkrycia łazików Spirit, Opportunity i Curiosity, które wykazały, że w przeszłości na Marsie istniały długotrwałe zbiorniki ciekłej wody i środowisko potencjalnie sprzyjające życiu.

Jednym z najbardziej spektakularnych osiągnięć ostatnich lat było wykorzystanie helikoptera Ingenuity, który dotarł na Marsa wraz z łazikiem Perseverance w 2021 r. Był to pierwszy kontrolowany lot statku powietrznego na innej planecie. Ingenuity udowodnił, że lot w ekstremalnie rzadkiej atmosferze Marsa jest możliwy. Wyznał w ten sposób drogę przyszłym powietrznym zwiadowcom i nowym metodom eksploracji.

Przyszłość badań Marsa

Plany dalszych misji marsjańskich koncentrują się na przejściu od etapu rozpoznania planety do znacznie bardziej zaawansowanych badań, ukierunkowanych na bezpośrednie poszukiwanie śladów dawnego życia oraz przygotowanie

przyszłej obecności człowieka na Marsie. Kluczowym celem najbliższych dekad jest nie tylko badanie planety na miejscu, lecz także sprowadzenie próbek marsjańskich skał na Ziemię do szczegółowych analiz laboratoryjnych.

Najważniejszym projektem w tym zakresie jest program Mars Sample Return, realizowany przez NASA we współpracy z Europejską Agencją Kosmiczną. Jego zadaniem jest odebranie próbek skał i regolitu, które obecnie zbiera łazik Perseverance, a następnie przetransportowanie ich na Ziemię. Byłby to przełom porównywalny z misjami księżycowymi Apollo, ponieważ umożliwiłby badania z użyciem aparatury, której nie da się umieścić na sondach kosmicznych. Szczególny nacisk zostanie położony na analizę składu izotopowego, struktur mikroskopowych oraz potencjalnych biosygnatur.

Istotnym elementem przyszłych misji będą eksperymenty technologiczne związane z przygotowaniem lotów załogowych. Obejmą one testy produkcji tlenu z marsjańskiej atmosfery, wykorzystania lokalnych zasobów, nowych metod ochrony przed promieniowaniem oraz systemów długotrwałego podtrzymywania życia. W tym sensie Mars stanie się nie tylko obiektem badań naukowych, lecz także poligonem doświadczalnym dla technologii, które w przyszłości umożliwią człowiekowi bezpośrednią eksplorację tej planety.

Załogowy lot na Marsa

Plany oficjalnych misji załogowych na Czerwoną Planetę koncentrują się na latach 2030–2040, choć dokładne terminy zależą od postępu rozwoju technologii i powodzenia wcześniejszych misji bezzałogowych. NASA zakłada wykorzystanie programu „Moon to Mars”, w ramach którego doświadczenia zdobyte podczas misji księżycowych Artemis posłużą przygotowaniu lotów na Marsa. Firma SpaceX planuje natomiast wysłanie tam pierwszych astronautów już pod koniec lat 20. XXI w., na pokładzie statku Starship. Misje te mają w założeniu łączyć wysiłki agencji kosmicznych z sektorem prywatnym.

Załogi marsjańskie mogłyby liczyć od kilku do kilkunastu osób, a czas trwania całej misji, od startu z Ziemi do powrotu, szacuje się na 2–3 lata. Lot w jedną stronę trwałby około 6–9 miesięcy, po czym załoga musiałaby oczekiwać na kolejne okno transferowe, aby wrócić na Ziemię.

Ochrona zdrowia załogi i życia ludzi jest najważniejszym wyzwaniem, co przedstawiamy w naszej książce o jakże frapującym tytule: *Czy powrócimy z Marsa?* Temat lotu na Marsa bywa bowiem nagminnie redukowany do kwestii inżynierskich i technicznych. My zwracamy uwagę na problemy, których pokonanie jest konieczne, aby można było podjąć próbę bezpiecznej podróży w obie strony. Zauważamy zagrożenia zdrowotne, które niezwykle często bywają zaniedbywane, a czasem wręcz nieuwzględniane, nawet w poważnych opracowaniach.

Planując loty załogowe na Marsa, projektanci statków kosmicznych stają przed szeregiem wyzwań technicznych związanych zarówno z samym transportem w przestrzeni kosmicznej, jak i z przetrwaniem ludzi na powierzchni planety przez wiele miesięcy.

Starship

Podstawowym elementem systemu transportowego ma być Starship firmy SpaceX, olbrzymi statek nośny wielokrotnego użytku, zdolny przewozić zarówno astronautów, jak i niezbędny sprzęt badawczy oraz zaopatrzenie. Statek będzie wyposażony w zaawansowane systemy podtrzymywania życia, które kontrolują ciśnienie, temperaturę, wilgotność oraz jakość powietrza na pokładzie. Planowane są również magazyny zapasów, urządzenia do recyklingu wody i powietrza oraz systemy ochrony przed promieniowaniem kosmicznym. Niestety statek nie zapewni „sztucznej” grawitacji, której brak spowoduje dodatkowe, poważne problemy zdrowotne, szczegółowo prezentowane w naszym opracowaniu.

Starship, nad którym pracuje firma SpaceX, jest dziś najbardziej konkretnym projektem środka transportu ludzi i ładunku na Marsa, choć wiele szczegółów nadal znajduje się w fazie testów i dopracowywania. Wraz z pierwszym stopniem, czyli boosterem raketowym Super Heavy, statek ma ponad 120 m wysokości, co czyni go jedną z największych rakiet w historii. Druga część systemu, czyli Starship sam w sobie, ma około 52 m długości i 9 m średnicy, a jego zbiorniki mogą pomieścić około 1500 ton ciekłych czynników napędowych – metanu i tlenu. Jest to ogromna rezerwa paliwa, która w połączeniu z możliwością tankowania na orbicie ma umożliwić lot na Marsa i manewry międzyplanetarne. Super Heavy, pierwszy stopień, wyposażony w około 33 silniki Raptor, ma odpowiadać za wyniesienie Starshipa z powierzchni Ziemi, a jego zbiorniki mieszczą około 3400 ton propelentów, co daje łączną masę startową systemu przekraczającą 5000 ton.

Problemy i zagrożenia

Biorąc pod uwagę dotychczas przedstawione informacje, wydaje się, że podróż na Marsa jest jedynie kwestią czasu. Do jej zrealizowania potrzebne są przede wszystkim trzy rzeczy: pieniądze, pieniądze i pieniądze. Oczywiście podstawową kwestią jest zbudowanie odpowiedniego statku kosmicznego, który zapewni pierwszym marsjańskim astronautom podróż. W naszej pracy kładziemy jednak nacisk na kwestie, które mają zapewnić załodze nie tylko efektywny transport, ale przede wszystkim przeżycie. Omawiamy więc zagadnienia medyczne i psychologiczne oraz proponujemy konkretne rozwiązania.

Problemy podczas misji kosmicznych nie ograniczają się tylko do ewentualnych awarii sprzętu. W rzeczywistości najłagodniejszym elementem statku kosmicznego jest człowiek – istota biologiczna, wrażliwa na warunki panujące w przestrzeni kosmicznej. Choć astronauta są starannie wyselekcjonowani i reprezentują wzorcowy stan zdrowia, nawet oni mogą w trakcie lotu doświadczać poważnego osłabienia organizmu. Przyczyną tego są zazwyczaj czynniki zewnętrzne, czasem wynikające z problemów technicznych, ale przede wszystkim związane z niekorzystnym wpływem środowiska kosmicznego, w tym promieniowania, które stale oddziałuje na ciało człowieka.

Promieniowanie kosmiczne

Promieniowanie kosmiczne w przestrzeni międzyplanetarnej składa się głównie z wysokoenergetycznych cząstek: około 90% stanowią protony, 9% to jądra helu, a około 1% – cięższe jądra pierwiastków. Dodatkowo obecne są elektrony i pozytony, również w niewielkiej ilości, oraz neutrony i promieniowanie gamma.

Działanie tych cząstek na organizm człowieka jest bardzo szkodliwe. Promieniowanie jonizuje atomy i molekuły w tkankach, prowadząc do przerywania nici DNA i mutacji, co zwiększa ryzyko nowotworów (zwłaszcza białaczki i raka tkanek miękkich). Uszkodzenia obejmują także układ krwionośny, co może prowadzić do osłabienia odporności i anemii. Wysokoenergetyczne jony ciężkich pierwiastków wpływają na układ nerwowy, powodując zaburzenia pamięci i funkcji poznawczych. Promieniowanie wywołuje stres oksydacyjny, stany zapalne i degenerację tkanek, a przy długotrwałej ekspozycji może zwiększać ryzyko chorób sercowo-naczyniowych.

Dla pełnego uświadomienia sobie wagi problemów związanych z zagrożeniem radiacyjnym, z którym będą musieli radzić sobie bohaterowie pierwszej misji marsjańskiej, spójrzmy na tabelę 1. Jeżeli przyjmimy, że w ciągu całej swojej kariery 45-letni astronauta może przyjąć maksymalną dawkę promieniowania na poziomie 1500 mSv (mężczyzna) / 900 mSv (kobieta) i porównamy te liczby z wartością przedstawioną w tabeli 1, to należy przyznać, że wyprawa na Czerwoną Planetę leży, jak na razie, na granicy ludzkich możliwości biologicznych.

Tabela 1. 1. Typowe wartości wynikające z ekspozycji na promieniowanie kosmiczne

Misja/Scenariusz	Równoważnik dawki [milisiwerty]
Średnia roczna dawka w Polsce	3,3
Średnia roczna dawka tła w Polsce	2,45
Średnia roczna dawka w USA	6,2
Średnia roczna dawka tła w USA	2,2
Standardowe zdjęcie rentgenowskie	0,2
Średnia roczna dawka załogi linii lotniczych (limit roczny)	2 (6)
Średnia dawka w programie Apollo	12
Dawka w misji Apollo 14 (najwyższa dawka skórną)	14
Prom kosmiczny (średnia dawka skórną)	4
Prom kosmiczny (najwyższa dawka skórną)	79
Trzecia załoga bazy orbitalnej Skylab 4 (najwyższa dawka skórną)	178
Międzynarodowa Stacja Kosmiczna (średnia dawka półroczna)	75

Misja/Scenariusz	Równoważnik dawki [milisiwerty]
Międzynarodowa Stacja Kosmiczna (dawka podczas misji rocznej)	215–310
2,5-letnia misja na Marsa	~1000
Sąsiedztwo elektrowni jądrowej	0,001
Tło naturalne Ziemi	2,4

Tabela została wykonana na podstawie danych z prac: [2], [4].

Mikrogravitacja

Mikrogravitacja także wywiera olbrzymi wpływ na ludzki organizm, powodując m.in. następujące zmiany:

- odwodnienie,
- zmniejszony przepływ krwi,
- deteriorację układu kostnego (demineralizacja i utrata masy kości),
- zmiany w czynnościach płuc,
- osłabienie i utratę mięśni,
- anemię (spadek produkcji erytrocytów),
- utratę osocza krwi i innych płynów ustrojowych,
- zaburzenia równowagi,
- osłabienie układu immunologicznego,
- chorobę kosmiczną, objawiającą się w postaci nudności, bólów i zawrotów głowy, letargu i wzmożonej potliwości,
- zmiany w czynności mózgu spowodowane zwiększonym gromadzeniem się krwi,
- obrzęk twarzy,
- przekrwienie błony śluzowej,
- zaburzenia snu.

Pył

O szkodliwym wpływie regolitu już wspomnieliśmy. Ze względu na swoje własności elektrostatyczne przywiera on do prawie wszystkich przedmiotów i materiałów, a zatem bardzo trudno go usunąć. Jego wdychanie prowadzi do pylicy płuc. Zabrudzony pyłem kombinezon, co doskonale pokazuje ryc. 2, nie stanowi zatem wyłącznie problemu estetycznego.



Ryc. 2. Dowódca misji Apollo 16 Eugene Cernan po powrocie ze spaceru po powierzchni Księżyca (źródło: https://archive.org/details/390895main_Gene_Cernan_covered_in_lunar_dust?)



Ryc. 3. Pleśń na ścianie Międzynarodowej Stacji Kosmicznej

(źródło: <https://www.science.org/content/article/space-station-mold-survives-200-times-radiation-dose-would-kill-human>)

Izolacja

Na pokładzie statku lecącego na Czerwoną Planetę z pewnością pojawią się też problemy wynikające z izolacji. Astronaucci spędzą wiele miesięcy w ograniczonej przestrzeni, z dala od rodziny, przyjaciół i znanego środowiska, co może wywoływać silny stres, depresję, lęki czy frustrację. Brak bezpośredniego kontaktu z Ziemią i niemożność szybkiego powrotu w razie problemów mogą potęgować poczucie osamotnienia i niepewności.

Astronaucci będą także narażeni na zaburzenia rytmu dobowego, czyli naturalnego cyklu snu i czuwania, który w normalnych warunkach synchronizuje się z 24-godzinny dzień ziemski. W statku kosmicznym nie ma naturalnych bodźców środowiskowych, takich jak zmiana światła dziennego i nocnego, co utrudnia organizmowi utrzymanie regularnego rytmu biologicznego. Sztuczne oświetlenie nie zawsze idealnie naśladuje cykle dnia i nocy, a ograniczona możliwość ekspozycji na światło słoneczne dodatkowo pogarsza synchronizację zegara biologicznego. Długotrwałe zaburzenia snu mogą także wpływać na funkcjonowanie układu odpornościowego, metabolizm, a nawet nastrój i stabilność emocjonalną.

Mikroorganizmy

Podczas lotu na Marsa oraz pobytu na powierzchni planety załoga może być narażona na zagrożenia zdrowotne związane z obecnością mikroorganizmów, zarówno pochodzenia ziemskiego, jak i, potencjalnie, marsjańskiego. Nawet najbardziej sterylne statki kosmiczne nie są całkowicie wolne od mikrobów, które mogą przeżyć i namnażać się w wilgotnych, ciepłych zakamarkach systemów podtrzymywania życia, rur czy filtrów powietrza. Bakterie, grzyby i wirusy pochodzące z Ziemi mogą powodować infekcje,

alergie bądź reakcje immunologiczne, zwłaszcza gdy układ odpornościowy astronautów będzie osłabiony.

Na samym Marsie pojawiają się dodatkowe, nieznane zagrożenia związane z potencjalnymi mikroorganizmami rodzimymi dla tej planety. Chociaż jak dotąd nie wykryto jednoznacznych dowodów na istnienie marsjańskich organizmów, nie można wykluczyć obecności prymitywnych form życia w glebie, podpowierzchniowym lodzie czy w wodnych osadach. Kontakt z takimi mikroorganizmami mógłby prowadzić do reakcji nieprzewidywalnych dla ludzkiego organizmu, w tym do infekcji lub reakcji toksycznych. Pandemia COVID-19 doskonale pokazała, jak niebezpieczne mogą być nowe gatunki mikrobów czy wirusów. Zagrożenie ze strony hipotetycznych marsjańskich wirusów i bakterii nie jest więc jedynie wymysłem scenarzystów filmów *science fiction*.

Pleśń

Pleśń w statku kosmicznym (patrz ryc. 3) również stanowi zagrożenie dla zdrowia astronautów oraz funkcjonowania systemów statku. W warunkach zamkniętej, hermetycznej kabiny mikroorganizmy takie jak grzyby mogą łatwo rozwijać się na wilgotnych powierzchniach, w filtrach powietrza, przewodach systemów klimatyzacyjnych lub w rejonach, w których dochodzi do kondensacji. Wysoka wilgotność i ciepło w niektórych częściach statku sprzyjają namnażaniu się pleśni, a brak naturalnej wentylacji utrudnia jej usuwanie.

Omówionych zagrożeń dla zdrowia i życia astronauty mogą się spodziewać z wielu stron. W artykule wymieniliśmy jedynie niektóre z problemów czyhających na marsjańskich śmiałków. Jak widać, pokonanie, a przynajmniej zminimalizowanie problemów do rozmiarów, które z dużym prawdopodobieństwem mogą zagwarantować sukces wyprawy, jest ogromnym wyzwaniem.

Czy powrócimy z Marsa?

W naszej książce *Czy powrócimy z Marsa?* wydanej w 2025 r. przez Oficynę Naukową (patrz ryc. 4) wyprawę marsjańską opisujemy w kontekście wielorakich problemów medycznych, wraz z wielowątkową analizą aspektów historycznych, ekonomicznych, jak również prawnych i etycznych związanych z taką ekspedycją.

Nasza publikacja ma wyraźny charakter edukacyjny. Zwracamy uwagę czytelników na zagrożenia, z których istnienia często nie zdają sobie sprawy osoby fascynujące się eksploracją kosmosu. Pokazujemy, jak poważny wpływ mogą one mieć na zdrowie człowieka. Choć patrzymy na misję marsjańską z dużym optymizmem, przedstawione w książce analizy są jednocześnie jasnym sygnałem ostrzegawczym przed jej pochopnym podjęciem. W sposób rzetelny i oparty na faktach ukazujemy skutki, z jakimi będą musieli zmierzyć się podróżnicy podczas wielomiesięcznego funkcjonowania w trudnym i wrogim dla człowieka środowisku. Misja na Marsa będzie nieocenionym źródłem wiedzy nie tylko o Czerwonej Planecie, ale także, a może przede wszystkim, o wpływie długotrwałych podróży kosmicznych na organizm ludzki.



Ryc. 4. Okładka książki *Czy powrócimy z Marsa? Jak leczyć się poza Ziemią*

Niestety, historia pokazuje, że pragnienie zapisania się na jej kartach bywa silniejsze niż głos rozsądku. Racjonalne rozważania często ustępują emocjom, a czasem wręcz lekko-myślności. Naszą książkę napisaliśmy właśnie po to, by spróbować zapobiec takiemu scenariuszowi. Przestrzegamy przed przygotowywaniem wyprawy na Marsa w sposób chaotyczny, pośpieszny i nieprofesjonalny, studząc entuzjazm tych, którzy bezkrytycznie wierzą w szybki sukces.

Dlatego apelujemy o rozwagę, odpowiedzialność i najwyższy poziom profesjonalizmu w przygotowaniach do

marsjańskiej misji. Podejmujemy takie decyzje, które nie doprowadzą do sytuacji, w której ci, którzy przetrwają samą podróż na Czerwoną Planetę, nie będą mieli realnych szans na powrót. Zrobimy wszystko, aby Mars stał się symbolem nadziei na pozaziemską przyszłość ludzkości, a nie pierwszym kosmicznym grobowcem przedstawicieli gatunku *Homo sapiens*.

Bibliografia:

- [1] Hadfield, C. (2017). Facebook. <https://www.facebook.com/AstronautChrisHadfield/photos/a.157475407603538/1958112927539768/> (dostęp: 31.10.2024).
- [2] Hodkinson, P.D., Anderton, R.A., Posselt, B.N., Fong, K. J. (2017). An overview of space medicine. *British Journal of Anaesthesia*, 119, (S1): i143–i157, DOI: <https://doi.org/10.1093/bja/aex336> (dostęp: 12.12.2020).
- [3] Kosek, P. (2019). Lecimy Na Księżyc – odwiedzamy stację kosmiczną. <https://www.youtube.com/watch?v=53GNS0qMRIU> (dostęp: 12.12.2020).
- [4] Moskal, P., Jozawee, S. (2012). Promieniowanie naturalne z Ziemi i z Kosmosu. *Foton*, 117. <https://foton.if.uj.edu.pl/documents/12579485/c72eee20-f215-47a2-b24d-ed1487df0a2a> (dostęp: 12.12.2020).
- [5] NASA (2009). Gene Cernan Covered In Lunar Dust. https://archive.org/details/390895main_Gene_Cernan_covered_in_lunar_dust (dostęp: 12.01.2026).
- [6] NASA (2025 ostatnia aktualizacja). Mars. <https://science.nasa.gov/mars/> (dostęp: 12.01.2026).
- [7] NASA (2024 ostatnia aktualizacja). Martian Dust Storm. <https://science.nasa.gov/resource/martian-dust-storm/> (dostęp: 12.01.2026).
- [8] Osarczuk, J., Halembert, M. (2025). *Czy powrócimy z Marsa? Jak leczyć się poza Ziemią*. Oficyna Naukowa. ISBN 978-83-67557-36-8. Warszawa.
- [9] Pass, J. (2008). Space Medicine: Medical Astrosociology in the Sickbay. 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 7–10 January 2008, Reno, Nevada. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2008-1465> (dostęp: 12.12.2020).
- [10] Lovett, R.A. (2019). Space station mold survives 200 times the radiation dose that would kill a human. <https://www.science.org/content/article/space-station-mold-survives-200-times-radiation-dose-would-kill-human> (dostęp: 12.01.2026).
- [11] Starship. Service to Earth Orbit, Moon, Mars and Beyond. <https://www.spacex.com/vehicles/starship> (dostęp: 12.01.2026).
- [12] Strugalski, Z. (1993). *Promieniowanie kosmiczne*. OWPW. ISBN: 83-85912-00-2. Warszawa.

OSTIV 2026

Jarosław Pytka

W dniach 18–22 maja 2026 r. odbył się XXXVII Kongres OSTIV. Tym razem miejscem obrad była Częstochowa, a ściślej Lotnisko Rudniki, gdyż kongres tradycyjnie odbywa się równocześnie i w tym samym miejscu co mistrzostwa świata w szybownictwie. Wydarzenie zgromadziło kilkudziesięciu uczestników z 13 krajów, przede wszystkim z Niemiec, Francji, Szwajcarii i innych państw europejskich, a także z USA, Kanady i Nowej Zelandii.

Kongresy OSTIV dotyczą naukowych i technicznych aspektów szybownictwa, w tym również meteorologii oraz modelarstwa lotniczego. Podczas tegorocznego wydarzenia przedstawiono kilkanaście referatów z zakresu techniki szybowcowej, konstrukcji, materiałoznawstwa, projektowania, badań w locie i osiągnięć, aerodynamiki i aeroelastyczności, pomocniczych układów napędowych oraz wyposażenia i przyrządów pokładowych. Odrębna grupa tematyczna skupiała się wokół prezentacji z zakresu bezpieczeństwa lotów

i szkolenia szybowcowego. W kilku referatach przedstawiono nową wiedzę z zakresu meteorologii, w tym prognozowania pogody i strategii lotu. Zagadnienia dotyczące techniki szybowcowej obejmowały projektowanie i osiągi szybowców, aerodynamikę, aeroelastyczność, przyrządy pokładowe oraz układy napędowe, podczas gdy pozostałe wystąpienia dotyczyły różnych aspektów szkolenia i bezpieczeństwa. W programie kongresu znalazł się cykl wydarzeń rozplanowanych na cały tydzień, w tym wycieczka turystyczna do Krakowa oraz uroczysta kolacja, będące okazją do integracji uczestników.

W gronie prelegentów kongresu znalazł się prof. Krzysztof Kubryński z Politechniki Warszawskiej, który zaprezentował trzy referaty. Dotyczyły one m.in. poprawy osiągnięć szybowca, a także aeroelastycznych odkształceń skrzydła.

Na tegorocznym kongresie miło było obserwować wzrost liczby młodych uczestników, nowych członków



Ryc. 1. W przerwie obrad. Od lewej stoją: dr inż. Michale Greiner, konstruktor szybowca ASG29/31, obecnie zatrudniony w Schenpp-Hirth Flugzeugbau, dr hab. inż. Jarosław Pytka, autor relacji, prof. Mark Maughmer z Instytutu Energii i Środowiska Pennsylvania State University, USA oraz prof. Rolf Radespiel z Politechniki w Brunshwiku, Niemcy, obecny prezydent OSTIV



Ryc. 2. Zrzut z ekranu aplikacji Flightradar24 z okolic Częstochowy, 19 maja 2026. Zwraca uwagę liczba szybowców i ich zagęszczenie w obszarach noszeń termicznych



Ryc. 3. System bliźniaczych chmur *Altostratus lenticularis*, towarzyszących zjawisku fali. Podczas tegorocznego Kongresu OSTIV zaprezentowano interesujący referat na temat nietypowych układów chmur i zjawisk im towarzyszących [1]

OSTIV. Zazwyczaj są to studenci na etapie przygotowania prac dyplomowych bądź doktoranci, ale przybywają również młodzi piloci szybowcowi, prezentujący własne doświadczenia w zakresie treningu, wyczynu, przygotowania i realizacji przelotów. Jest to niezwykle cenne, gdyż od zaangażowania młodego pokolenia zależy przyszłość Organizacji i naukowotechniczna jakość kongresów. Chociaż technika szybowcowa jest dziedziną niszową, młodzi uczestnicy mogą liczyć na rozwój zawodowy w ogólnie pojmowanej aerodynamice, np. przy projektowaniu i badaniach siłowni wiatrowych czy w przemyśle motoryzacyjnym.

Materiały kongresowe zawierające rozszerzone streszczenia prezentacji są udostępniane publicznie na stronie internetowej Organizacji. W jednym z kolejnych numerów „Techniki Lotniczej i Astronautycznej” zamieścimy obszerny artykuł zawierający wybrane zagadnienia zaprezentowane przez prelegentów w Rudnikach.

Bibliografia:

- [1] West J., *Lee Wave Clouds Explained*. Proc. XXXVII OSTIV Congress, 18–22 maja 2026, Częstochowa.

Propfan – kompromis między silnikiem turbośmigłowym a turbowentylatorowym

Mateusz Jerominek,
Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Chełmie

Streszczenie

W artykule opisano historię rozwoju i technologię propfanów – innowacyjnych silników lotniczych łączących cechy silników turbośmigłowych i turbowentylatorowych. Przedstawiono genezę projektu oraz jego wpływ na postępy w dziedzinie materiałów, aerodynamiki i redukcji hałasu.

Wspomniano także o aktualnie trwających badaniach, które wskazują na możliwość powrotu omawianej technologii w kontekście zrównoważonego lotnictwa.

Słowa kluczowe: propfan, wentylatory bezkanałowe, oszczędność paliwa, nowoczesne technologie lotnicze

Wprowadzenie

Koszty paliwa stanowią około 30% wydatków operacyjnych linii lotniczych [2]. W celu ograniczenia tych wydatków, a w rezultacie cen biletów, codziennie badane są nowe rozwiązania. Jednym z nich jest wprowadzenie propfanów, znanych również jako wentylatory bezkanałowe. Zaprojektowane jako połączenie silnika turbowentylatorowego i turbośmigłowego, łączą one najlepsze elementy obu napędów, zapewniając znaczną poprawę efektywności paliwowej przy jednoczesnym zachowaniu wysokich prędkości przelotowych. Rozwój tej technologii dał również

początek współcześnie stosowanym rozwiązaniom w budowie silników wentylatorowych.

Geneza projektu

Już w latach 40. XX w. firma Hamilton Standard prowadziła prace nad śmigłami o skośnych łopatach, inspirowanymi aerodynamiką skrzydeł naddźwiękowych. Celem było stworzenie śmigieł pozwalających samolotom osiągać prędkości typowe dla samolotów z silnikami turbowentylatorowymi i turbodrzutowymi.

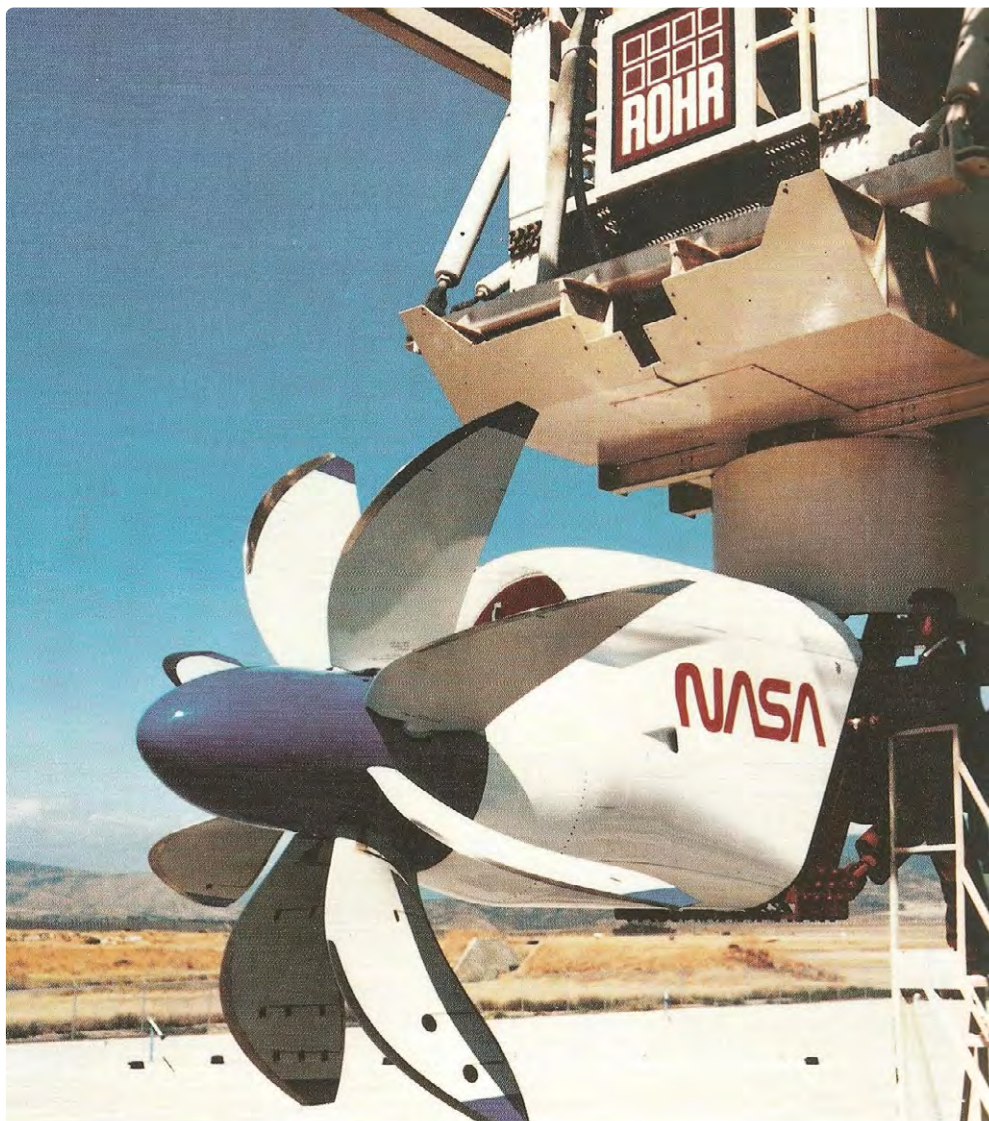
Mimo że pomysł wydawał się obiecujący, technologia tamtych czasów nie mogła poradzić sobie z trudnościami wynikającymi z takiej budowy, wskutek czego projekt został wstrzymany. Największym problemem był flutter łopat oraz związane z nim naprężenia.

Zaawansowany silnik turbośmigłowy

Kryzys naftowy w 1973 r. zmienił nastawienie Amerykanów wobec paliwa. Ze względu na rosnące ceny i ograniczone zasoby wśród społeczeństwa wzrosła popularność samochodów ekonomicznych. Linie lotnicze mogły zrekompenzować wzrost cen paliwa jedynie poprzez zmniejszenie



Ryc. 1. Silnik GE36 (źródło: [1])



Ryc. 2. Allison 501-M78 na naziemnej platformie testowej (źródło: [5])

liczby wykonywanych lotów lub zwiększenie cen biletów, co jednocześnie wiązałoby się z utratą klientów. Na polecenie rządu Stanów Zjednoczonych NASA wdrożyła 10-letni plan mający na celu rozwiązanie tego problemu. Przeanalizowano wszystkie potencjalne rozwiązania, które zmniejszyłyby zużycie paliwa bez jednoczesnej utraty wydajności. Spośród rozwijanych sześciu projektów jedną z największych oszczędności zużycia paliwa dla samolotów poddźwiękowych obiecywał „zaawansowany silnik turbośmigłowy” (ATP) [3]. Projekt spotkał się z bardzo negatywną opinią ze względu na wysokie ryzyko oraz negatywne nastawienie do śmigłowych silników tłokowych, związane z kosztem ich utrzymania i wadliwością przekładni.

Oceny niektórych były tak silne, że zarzekali się, iż żaden samolot komercyjny nie będzie już napędzany śmigłem [4].

Mimo wszystko do roku 1980 wyniki były na tyle zadowalające, że do badań, dotychczas głównie prowadzonych przez NASA oraz Hamilton Standard, przyłączyli się inni producenci silników, tacy jak Pratt & Whitney (P&W) oraz Allison [6].

W tym samym czasie General Electric (GE) pracował nad alternatywnym systemem. Testowy projekt NASA zakładał system śmigła ciągnącego ze stosunkowo skomplikowaną przekładnią. GE36 zastosował system pchający, bezprzekładniowy, składający się z dwóch śmigieł o przeciwbieżnym obrocie, wyprzedzając tym samym badania NASA.

Silnik nazwano *unducted fan* (UDF), podkreślając jego pokrewieństwo z silnikami wentylatorowymi. W roku 1986 odbył swój pierwszy lot testowy na Boeingu 727 [7].

P&W i Allison podjęły się dalszego rozwoju silnika opracowywanego wraz z NASA, w efekcie czego powstał silnik PW-Allison 578-DX. Największą jego wadą w ujęciu eksploatacji była obecność przekładni, przez co nie cieszył się takim zainteresowaniem jak silnik produkcji GE, jednak doczekał się lotu na samolocie McDonnell Douglas MD-80 w 1987 r.

Wszystkie silniki wchodzące w skład ATP dowiodły podczas lotów testowych, że przewidywane przez NASA w latach 70. oszczędności na paliwie rzędu 20–30% są osiągalne. Amerykańskie media zaczęły mówić o nadchodzącej rewolucji w komercyjnym transporcie lotniczym. „New York Times”



Ryc. 3. Silnik PW-Allison 578-DX podczas testów na samolocie MD-80 (źródło: [8])

zapowiadał „powrót śmigieł”, a „Washington Post” ogłosił, że „silniki turbośmigłowe wracają” [9]. Plany były rozległe, silniki miały znaleźć się w najnowszych samolotach pasażerskich, a nawet zastąpić aktualnie zainstalowane silniki turbowentylatorowe w starszych modelach.

W 1986 r. kraje OPEC, zwłaszcza Arabia Saudyjska, zwiększyły produkcję ropy, co doprowadziło do załamania cen. Cena ropy, która w 1970 r. wynosiła ok. 3,30 dolara za baryłkę, spadła z około 38 dolarów w 1980 r. do poniżej 15 dolarów za baryłkę w połowie 1986 r. Koszty wprowadzenia nowej technologii propfanów wyceniono na wyższe niż koszt dalszego wykorzystywania samolotów napędzanych silnikami turbowentylatorowymi, przez co nie zostały one zaimplementowane, a zainteresowanie projektem zmalało. Niemniej opracowane w czasie jego trwania innowacje i rozwiązania przyczyniły się w dużej mierze do zmniejszenia hałasu, poprawy wydajności oraz rozwoju materiałów do produkcji łopat. Ośrodek badawczy NASA, Lewis

oraz członkowie ATP otrzymali w 1987 r. nagrodę Coliera – przyznawaną w Ameryce każdego roku (od 114 lat) za największe osiągnięcia w lotnictwie lub astronautyce. Jest to najbardziej prestiżowe wyróżnienie w tej kategorii.

Rozwój technologii

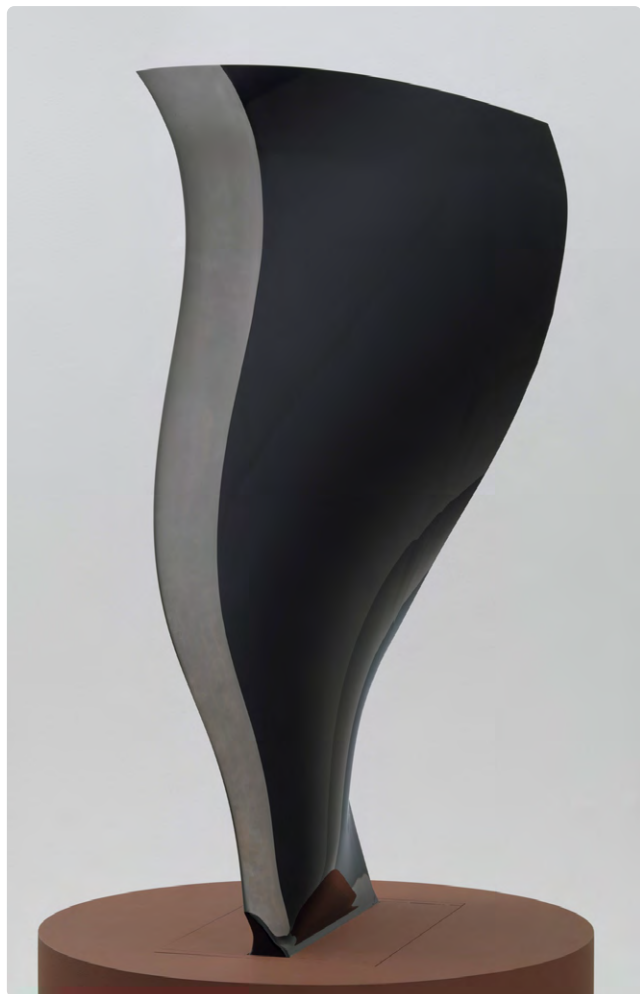
Propfany, mimo że nie zostały wprowadzone na szeroką skalę, rzuciły nowe światło na wiele aspektów budowy elementów silników. Podczas badań nad GE36 General Electric zyskało ogromne doświadczenie w produkcji kompozytowych łopat. Włókno węglowe pozwalało na tworzenie większych, lżejszych i bardziej aerodynamicznych łopat od tradycyjnych tytanowych [12].

Wiedzę tę wykorzystano przy budowie silnika GE90, który dzięki zastosowaniu kompozytowych łopat, stał się jednym z najlepszych silników produkowanych przez GE. Rekordowy na tamte czasy rozmiar wentylatora i zastosowanie łopat o bardzo złożonej geometrii pozwoliły na osiągnięcie najwyższej dotąd wartości ciągu i znaczące ograniczenie hałasu. GE90 jest wciąż stosowany w samolotach Boeing 777, doczekał się także wielu wariantów i był bazą do stworzenia silników General Electric GENx i GE9X.

Propfany nie zostały całkowicie zapomniane, co potwierdzają współczesne projekty, takie jak np. CFM International RISE, przy budowie którego prześląlane zostały na nowo niektóre aspekty dotychczasowych propfanów. W przeciwieństwie do dwóch przeciwbieżnych wieńców łopat w RISE zastosowano obrotowy wieniec w połączeniu z nieruchomymi satorami.



Ryc. 4. Wykres cen baryłki ropy w Stanach Zjednoczonych w latach 1970–1995 (źródło: [11])



Ryc. 5. Łopata wentylatora GE90-115B w Muzeum Sztuki Nowoczesnej w Nowym Jorku (źródło: [11])

Podsumowanie

Największym wrogiem propfanów okazała się opinia publiczna. Po wprowadzeniu silników wentylatorowych śmigła zaczęto określać jako archaiczne. Ponadto, choć oferują oszczędność paliwa, wytwarzany przez nie hałas pozostaje wyzwaniem. Dziś propfany są ciekawostką technologiczną i choć nie zdominowały nieba, doprowadziły do rozwoju w dziedzinie kompozytów i poprawy aerodynamiki łopat. W kontekście rosnącej presji na redukcję emisji i zużycia paliwa mogą jeszcze odegrać istotną rolę w przyszłości lotnictwa cywilnego.

Bibliografia (ułożona zgodnie z kolejnością przywoływania artykułów w tekście):

- [1] GE Aerospace GE36 engine. <https://www.geaerospace.com/news/articles/paris-airshow-sustainability-technology/how-rise-arose-story-behind-decades-innovations> (30.07.2026).
- [2] International Air Transport Association. (2024). *Airfare, jet fuel price, and inflation*. <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/airfare-jet-fuel-price-and-inflation/> (15.04.2026).
- [3] United States General Accounting Office. (1980). *A Look at NASA's Aircraft Energy Efficiency Program*. <https://www.gao.gov/assets/psad-80-50.pdf> (05.04.2026).
- [4] Bowels, M.D. (2010). *The "Apollo" of aeronautics NASA's Aircraft Energy Efficiency Program 1973–1987*. https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2015/04/601247main_ApolloAeronautics-ebook.pdf (30.07.2026).
- [5] Hager, R.D., Vrabel, D. (1988). *Advanced Turboprop Project*. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19890003194> (23.04.2026).
- [6] Bowels, M.D., Dawson, V. P. (1998). *The Advanced Turboprop Project: Radical Innovation in a Conservative Environment in From Engineering Science to Big Science*. <https://www.nasa.gov/history/SP-4219/Contents.html> (30.07.2026).
- [7] Villamizar, H. (2024). *8/20/1986: First Test-Flight of a Propfan Engine, Helwing Villamizar*. <https://www.airwaysmag.com/new-post/first-propfan-engine-test-flight> (24.04.2026).
- [8] Kawai, R. (2008). *Quiet Cruise Efficient Short Take-off and Landing Subsonic Transport System*. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20080015836> (30.07.2026).
- [9] Pollack, A. (1985, October 10). *The Return of Propellers*. *New York Times*, p. D2.
- [10] Vickery, H. (1984, November 1). *Turboprops are back!* *Washington Time*, p. 5B.
- [11] Macrotrends. (2025). *Crude Oil Prices – 70 Year Historical Chart*. <https://www.macrotrends.net/1369/crude-oil-price-history-chart> (31.05.2026).
- [12] Museum of Modern Art. (2001). *GE Aircraft Engines Jet Engine Fan Blade (model GE90-115B)*. https://www.moma.org/collection/works/93637?artist_id=27641&page=1&sov_referrer=artist (30.07.2026).
- [13] GE aerospace press release. (2015). *GE's Composite Fan Blade Revolution Turns 20 Years Old*. <https://www.geaerospace.com/news/press-releases/commercial-engines/ges-composite-fan-blade-revolution-turns-20-years-old> (30.04.2026).

Innowacje koncepcyjno-technologiczne w zakresie niewykrywalności współczesnych samolotów bojowych przez radar

Hubert Górski

Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Chełmie

Streszczenie

W artykule omówiono technologie wykorzystywane we współczesnych samolotach bojowych, które ograniczają podatność na wykrycie przez radar. Przedstawiono szereg metod, za pomocą których jest to realizowane. Zestawiono rodzaje materiałów dawniej stosowanych do tego celu oraz te wykorzystywane i rozwijane obecnie. Omówiono też perspektywy użycia tych materiałów w przyszłości. Przeanalizowano konieczność rozwoju technologii zmniejszania echa radarowego w kontekście zmieniających się realiów pola bitwy.

Słowa kluczowe: materiały, radar, fale, odbicie, absorpcja, wojsko

Wprowadzenie

Realia dzisiejszego pola walki zmuszają konstruktorów samolotów bojowych do stosowania coraz wydajniejszych metod zabezpieczających przed ich wykrywaniem, głównie z pomocą radarów. Na przykładzie współczesnych konfliktów zbrojnych wykorzystujących lotnictwo (np. niedawne starcia powietrzne w konflikcie indyjsko-pakistańskim) widać, że kończą się czasy walk manewrowych na niewielkich odległościach, gdzie liczy się prędkość i zwrotność, a wzrasta znaczenie walk na duże odległości z wykorzystaniem pocisków naprowadzanych dalekiego zasięgu. Sprawia to, że zmniejszenie echa radarowego samolotu daje ogromną przewagę, bo pozwala wykryć przeciwnika, samemu pozostając niezauważonym, i zaatakować z zaskoczenia z dużej odległości [1].

Radary wykorzystywano do wykrywania samolotów już w czasach II wojny światowej. Już wtedy podejmowano również pierwsze próby zmniejszania echa radarowego, m.in. poprzez zastosowanie farb ferrytowych, którymi pokrywano głównie powierzchnie okrętów podwodnych. W tamtym okresie farby tego typu nie były powszechnie używane w lotnictwie.

W przypadku samolotów wczesne sposoby na unikanie radarów przeciwnika obejmowały głównie operowanie na bardzo dużej wysokości i z bardzo dużą prędkością. Przykładami maszyn mogących zrealizować taki lot są SR-71 Blackbird i MiG-31 [2]. Szczególnie intensywne prace nad technologią pozwalającą bezpośrednio zmniejszyć echo radarowe samolotów bojowych rozpoczęły się w latach 70. XX w. wraz z powstaniem samolotu Lockheed F-117 Nighthawk (ryc. 2), który został ukończony i oblatany

w latach 80. XX w. [3], [4]. We współczesnych samolotach bojowych stosuje się dwie główne metody zmniejszania echa radarowego, które są stale rozwijane. Przede wszystkim wykorzystuje się zjawisko odbicia fali. Powierzchnie samolotu kształtuje się tak, aby odbijały fale radarowe w przewidywalny sposób, w kierunku innym niż źródło sygnału, czyli sam radar, do którego fala musi wrócić, aby samolot został wykryty. Drugim sposobem jest absorpcja fal i przekształcanie ich w inny rodzaj energii.

Działanie radaru

Radar to urządzenie służące do wykrywania obiektów oraz określania ich lokalizacji i ruchu z wykorzystaniem fal elektromagnetycznych. Nazwa „RADAR” pochodzi od angielskiego skrótu *Radio Detection And Ranging*, czyli „radiowe wykrywanie i pomiar odległości”. Jego działanie opiera się na współpracy kilku podstawowych bloków technicznych, takich jak nadajnik, antena, odbiornik oraz układ przetwarzania sygnału. Nadajnik generuje sygnał radarowy w postaci krótkich impulsów o wysokiej mocy lub sygnału ciągłego. Stąd wyróżnia się radary wysyłające pojedyncze impulsy (*pulsed operation*) i radary pracujące w trybie ciągłym (*continuous wave*). Sygnał ten jest przekazywany do anteny, która formuje wiązkę elektromagnetyczną i wysyła ją w określonym kierunku. Fale radarowe, będące falami



Ryc. 1. Radar wczesnego ostrzegania wykorzystywany przez RAF w czasach II wojny światowej (źródło: <https://www.worldhistory.org/image/18878/chain-home-radar-towers/>)



Ryc. 2. Samolot F-117 Nighthawk wyróżniający się płaskimi, pochylonymi powierzchniami służącymi odbijaniu fal radarowych (źródło: Peter R. Foster, <https://www.key.aero/article/going-war-f-117-pilots-perspective>)

elektromagnetycznymi, rozchodzą się z prędkością światła i po napotkaniu obiektu ulegają częściowemu odbiciu, a odbita fala trafia do anteny odbiornika. W radarach monostatycznych ta sama antena jednocześnie nadaje i odbiera sygnał, natomiast w przypadku radarów bistatycznych wykorzystywane są osobne anteny nadawcze i odbiorcze, które mogą znajdować się w innych miejscach. Po odebraniu sygnału przez antenę odbiorczą odbiornik wzmacnia sygnał echa, filtruje go w celu ograniczenia zakłóceń oraz przekształca do postaci umożliwiającej dalszą analizę. Na podstawie czasu opóźnienia pomiędzy wystąpieniem impulsu a odebraniem echa system radarowy wyznacza odległość do obiektu, z kolei kierunek, z którego sygnał został odebrany, zależy od aktualnego położenia i charakterystyki kierunkowej anteny. Zmiana częstotliwości sygnału odbitego, wynikająca z efektu Dopplera, pozwala określić prędkość obiektu. Istotnym pojęciem związanym z działaniem radarów jest skuteczna powierzchnia odbicia radarowego, określana angielskim terminem *Radar Cross Section* (RCS), która opisuje, jak widoczny jest dany obiekt dla radaru. RCS nie jest fizyczną powierzchnią geometryczną obiektu, lecz wielkością umowną, wyrażaną najczęściej w metrach kwadratowych, zależną od wielu czynników, takich jak rozmiar obiektu, jego kształt, materiał, orientacja względem anteny radarowej oraz częstotliwość pracy radaru. Przykładowo, duży samolot transportowy może mieć skuteczną powierzchnię odbicia rzędu kilkudziesięciu lub nawet kilkuset metrów kwadratowych, myśliwiec bojowy kilku metrów kwadratowych, natomiast obiekty o obniżonej wykrywalności, projektowane w technologii *stealth*, mogą charakteryzować się RCS poniżej

0,1 m². Im większa wartość RCS, tym silniejsze echo wraca do odbiornika i tym łatwiejsza jest detekcja obiektu na dużych odległościach, natomiast mała skuteczna powierzchnia odbicia powoduje znaczne osłabienie sygnału powrotnego i skrócenie zasięgu wykrycia. RCS zależy też od długości fali odbitej od obiektu, ponieważ obiekt może inaczej odbijać fale o długości kilkudziesięciu centymetrów niż fale o długości kilku centymetrów, co sprawia, że ten sam cel może być dobrze widoczny dla jednego pasma radarowego, a znacznie gorzej dla innego [5].

Tabela 1. Skuteczna powierzchnia odbicia radarowego przykładowych obiektów [3]

Obiekt	RCS (m ²)
B-52	100–125
F-16A	5
B-2	0,1
F-117A	0,025
Ptak	0,01
F-35	0,0015–0,005
Owad	0,001
F-22	0,0001–0,0005



Ryc. 3. Northrop B-2 Spirit. Pozbawienie samolotu statecznika pionowego pozwoliło znacznie ograniczyć echo radarowe (źródło: <https://www.defenseindustrydaily.com/usas-b2-bombers-leading-the-way-in-contracting-for-availability-02950/>)



Ryc. 4. Spód samolotu Su-57. Widoczne wewnętrzne komory uzbrojenia w pozycji otwartej (źródło: <https://www.twz.com/air/su-57-felon-brandishes-its-loaded-weapons-bays-for-the-first-time>)

Odbicie

Odpowiednie ukształtowanie powierzchni jest podstawowym sposobem na polepszenie niewykrywalności przez radar. Działanie radaru opiera się na wysłaniu wiązki fali elektromagnetycznej, która ma za zadanie odbić się od samolotu i wrócić do miejsca, z którego została wyemitowana. Jako że w typowym przypadku wiązka fali radarowej wysłana z radaru będzie padać na samolot pod kątem niemal równoległym do horyzontu lub z kierunku trochę poniżej horyzontu, głównymi powierzchniami, które odbijają fale pod kątem umożliwiającym wykrycie są stateczniki pionowe oraz bok kadłuba. Powierzchnię samolotu można porównać do lustra. Jeśli powierzchnia lustra jest ustawiona względem

obserwatora prostopadle, to obserwator zobaczy w nim swoje odbicie, jeśli natomiast zostanie obrócone o pewien kąt, odbicie obserwatora nie będzie widoczne. Podobna zasada jest warunkiem wykrycia samolotu przez radar, który musi „zobaczyć swoje odbicie” w samolocie. Z tego powodu w maszynach o obniżonej wykrywalności stosuje się pochylone stateczniki pionowe lub nawet całkowicie się z nich rezygnuje, tak jak w bombowcu B-2 Spirit (ryc. 3). Kadłub formuje się w taki sposób, aby wszystkie powierzchnie były nachylone pod pewnym kątem do pionu, co jest szczególnie widoczne w przypadku wcześniej wspomnianego samolotu F-117 Nighthawk. Z podobnych względów większość współczesnych myśliwców ma skrzydła mocno zintegrowane z kadłubem, bez wyraźnej granicy pomiędzy

tymi elementami. Poza korzyściami aerodynamicznymi takie rozwiązania zmniejszają prawdopodobieństwo, że wiązka odbita od kadłuba zostanie skierowana w stronę skrzydła, a następnie w stronę źródła wiązki. Niezbędne jest także ukrycie wszelkiego uzbrojenia w komorach wewnątrz kadłuba. Wszystkie nieregularne kształty i wystające elementy mogą zawierać powierzchnie, które odbijają potencjalną wiązkę w kierunku jej źródła. Istotne jest też pozbycie się regularnych kształtów kulistych, ponieważ kula obserwowana z dowolnego punktu jest identyczna i zawsze zawiera jeden fragment powierzchni nachylony do obserwatora pod kątem 90° . Mimo że jest on teoretycznie nieskończenie mały, ułatwia to jego wykrycie przez radar. Poza tym takich fragmentów jest nieskończenie wiele, a każdy nachylony jest pod innym kątem, przez co kulisty kształt jest widoczny dla radaru z dowolnej strony [2].

Odbicie fali może być skuteczną metodą uniknięcia wykrycia przez radar, jednak ma pewne ograniczenia. Wymaga podporządkowania kształtu kadłuba założeniom pozwalającym ograniczyć wykrywalność, które nie zawsze idą w parze z założeniami aerodynamicznymi i utrudniają wyposażenie samolotu w uzbrojenie. Należy także wziąć pod uwagę, że w niektórych sytuacjach powierzchnie zaprojektowane tak, aby przekierować wiązkę, znajdują się w położeniu prostopadłym względem radaru i staną się nieskuteczne. Trzeba również pamiętać, że radary często współpracują jako sieć wielu obiektów rozmieszczonych w dużych odległościach od siebie i wiązka wysłana z jednego radaru może odbić się od samolotu, po czym zostać odebrana przez stację położoną w innym miejscu [3]. Projektowanie trudnego do wykrycia samolotu jest zatem grą kompromisów, w której oprócz metod polegających na odbiciu fali stosuje się dodatkowo inne rozwiązania.

Pochłanianie

Drugim sposobem na sprawienie, by wiązka wysłana z radaru nie powróciła do niego i obecność samolotu nie została zarejestrowana, jest pochłonięcie fali. W tym celu stosuje się materiały lub farby zdolne do absorbowania fal elektromagnetycznych nazywane RAM (z ang. *Radiation Absorbing Materials*). Fala taka jest nośnikiem energii i gdy natrafia na jakąś powierzchnię, zostaje pochłonięta lub odbita. Stosując analogię do światła widzialnego, które jest przecież tym samym rodzajem fali, można powiedzieć, że materiały pochłaniające działają jak czarna farba, tyle że dla zakresu długości fal stosowanych w technice radarowej. Najstarszym, choć oczywiście udoskonalonym w stosunku do pierwszych wersji, rodzajem takiego materiału jest wspomniana już farba ferrytowa. Zawiera ona cząsteczki żelaza karbonylowego lub innych materiałów ferromagnetycznych, które pod wpływem działania fali elektromagnetycznej drgają, zamieniając energię fali na energię mechaniczną, która następnie jest rozpraszana w postaci ciepła [3]. Jako materiały pochłaniające fale emitowane przez systemy radarowe stosuje się także niektóre kompozyty z włókna węglowego. Mają one tę zaletę, że są także

dobrym materiałem konstrukcyjnym i nadają się do budowy elementów strukturalnych przenoszących obciążenia, co daje im przewagę nad farbą, która jedynie zwiększa masę samolotu [2]. Zastosowanie kompozytów złożonych z włókien, które są trwalsze od farby, pozwala również zmniejszyć czas niezbędny na serwis podczas obsługi technicznej. Samolot mniej czasu spędza na ziemi, co bezpośrednio przekłada się na możliwość wykorzystania go w boju [3]. Materiały bazujące na węglu to m.in. te, które wykorzystują grafit, grafen oraz, tańsze od grafenu, nanorurki węglowe. Pewnego rodzaju innowacją w zakresie niewykrywalności przez radar są metamateriały, czyli „sztucznie wytwarzane struktury o ściśle określonych właściwościach elektromagnetycznych, zbudowane z wielu identycznych jednostek tworzących sieci jedno-, dwu- lub trójwymiarowe. Są one strukturami w znacznym stopniu przypominającymi naturalne kryształy, przy czym rolę atomów lub molekuł odgrywają tu owe jednostki – komórki elementarne w postaci miniaturowych obwodów rezonansowych wykonanych z metalu. Obwody te składają się najczęściej z prostych rezonatorów oddziałujących ze zmiennym polem magnetycznym i prostoliniowych przewodników odpowiedzialnych za ich plazmopodobne zachowanie się w zmiennym polu elektrycznym. Makroskopowe właściwości elektromagnetyczne metamateriałów, podobnie jak substancji naturalnych, określone są przez przenikalności – elektryczną i magnetyczną, które w ogólności są funkcjami zespolonymi i zależą od częstotliwości pola. Istotną cechą metamateriałów jest to, że ich parametry elektromagnetyczne mogą być dobierane dość swobodnie poprzez zmianę kształtu i wymiarów mikroobwodów” [6]. Metamateriały wzbudziły duże zainteresowanie ze względu na szereg niespotykanych właściwości, m.in. ujemny współczynnik załamania fal elektromagnetycznych. Sprawia on, że fale elektromagnetyczne załamujące się na granicy ośrodków, zgodnie z prawem Snella, załamują się w przeciwnym kierunku względem tego, w którym załamują się fale w materiale o współczynniku dodatnim. Innym, wartym uwagi z perspektywy przemysłu zbrojeniowego efektem, uzyskiwanym dzięki zastosowaniu metamateriałów, jest odwrócony efekt Dopplera. Gdy obiekt, od którego odbija się fala, zbliża się do źródła tej fali, częstotliwość fali odbitej staje się większa. Efekt ten jest trudny do osiągnięcia, ale został udowodniony eksperymentalnie. Potencjalnie zastosowanie metamateriału w samolocie bojowym może więc, oprócz zmniejszenia prawdopodobieństwa wykrycia, zmylić radary wykorzystujące efekt Dopplera co do kierunku lotu, znajduje więc zastosowanie nawet jeśli nie spełnia swojej podstawowej funkcji [7].

Połączenie dwóch metod

Oprócz oczywistej możliwości równoległego zastosowania specjalnie dobranego kształtu powierzchni umożliwiającego odbicie fali oraz materiałów wykorzystujących zjawisko absorpcji, dostępne są także rozwiązania łączące obie techniki tak, aby jeszcze bardziej spotęgować efekt ich działania. Materiały RAM, choć skuteczne, nie zapewniają

całkowitego zaabsorbowania fal elektromagnetycznych przy pierwszym kontakcie, ale zmuszenie fali do przebycia jak najdłuższej drogi przez materiał absorbujący pozwala skutecznie pozbawić ją resztek energii. Jest to możliwe dzięki zastosowaniu odpowiedniego kształtu, np. klinów wykonanych ze standardowych materiałów, i wypełnieniu pustych miejsc między klinami materiałem absorbującym. Fala odbija się wielokrotnie pomiędzy nachylonymi powierzchniami, wytracając jednocześnie energię z uwagi na znajdowanie się w materiale silnie absorbującym. Całość można przykryć od zewnątrz materiałem przenikalnym dla fal o częstotliwości przewidzianej jako ta, która będzie wykorzystywana przez radar. Pozwala to uzyskać gładką, spełniającą wymagania aerodynamiczną powierzchnię. Inną metodą jest nałożenie na siebie dwóch warstw materiałów o różnych właściwościach. Warstwa zewnętrzna może być wykonana z materiału, który częściowo przepuszcza falę, a częściowo ją odbija. Grubość tej warstwy odpowiada połowie długości fali. Warstwa wewnętrzna całkowicie odbija falę. Sprawia to, że wiązka, która przeniknie przez pierwszą warstwę i odbije się od warstwy wewnętrznej, spotka się z falą odbitą od warstwy zewnętrznej w przeciwfazie. To zaś spowoduje wzajemne wygaszenie obu wiązek. Wadą tego rozwiązania jest skuteczne działanie tylko dla określonych długości fali [2]. Znaczenie ma też kąt padania wiązki, który zmienia rzeczywistą odległość, jaką musi przebyć wiązka w warstwie zewnętrznej, zmieniając tym samym to, jaka długość fali zostanie wygaszona.

Podsumowanie

Rozwiązania techniczne w zakresie niewykrywalności przez radar stanowią w realiach dzisiejszego pola walki ważny aspekt rozwoju techniki wojskowej. Stopniowa zmiana charakteru walk powietrznych ze starć na małych odległościach, z wykorzystaniem dynamicznych manewrów wymagających zwrotności, na rzecz długodystansowych konfrontacji z użyciem uzbrojenia o dużym zasięgu rażenia (gdzie liczy się to, kto zdąży pierwszy wykryć przeciwnika i strzelić) napędza rozwój nowych technologii opóźniających moment wykrycia samolotu przez radar nieprzyjaciela. Technologie wykorzystujące powłoki absorbujące, choć znane od czasów

II wojny światowej, zdają się dynamicznie rozwijać i to one najprawdopodobniej będą stanowić przyszłość rozwoju lotnictwa wojskowego w tym aspekcie. Szczególnie obiecujące mogą być powłoki wykorzystujące metamateriały. Ich możliwości są wciąż rozwijane, a granice potencjału tych powłok nie są jeszcze znane. Warto pamiętać, że dostęp do najświeższej wiedzy odnoszącej się do omawianej tematyki jest zapewne mocno ograniczony, ponieważ wiele szczegółów technicznych dotyczących tego rodzaju technologii to informacje z oczywistych względów niejawne. W związku z tym większości ludzi nieznana jest nie tylko przyszłość omawianych technologii, ale także stan obecny. Informacje na temat dzisiejszych odkryć w tej dziedzinie będą zapewne powszechnie dostępne dopiero za wiele lat.

Bibliografia:

- [1] Kostis, T.G. (2025). The future of stealth military doctrine. *Joint Force Quarterly*, 116, 132–140. <https://digitalcommons.ndu.edu/joint-force-quarterly/vol116/iss4/19/>.
- [2] Kapur, V. (2014). *Stealth technology and its effect on aerial warfare*. Institute for Defence Studies and Analyses. New Delhi. ISBN: 978-93-82169-34-5 <https://catalog.princeton.edu/catalog/9996082723506421#view>.
- [3] Harmsel, J. (2023). Stealth on Aircraft; A Literature Review. University of Twente. https://www.researchgate.net/publication/375462852_Stealth_on_Aircraft_A_Literature_Review.
- [4] Jha, B.K., Aswale, M.S. (2016). Mechanical Aspects in Stealth Technology: Review. *International Journal of Engineering and Technical Research*, 4(4), 21–27. https://www.erpublishing.org/published_paper/IJETRO41555.pdf.
- [5] Showman, G. (2011). *Radar Fundamentals*. 12th Annual International Symposium on Advanced Radio Technologies, Boulder, Colorado, USA.
- [6] Wolarz, E. (2007). Metamateriały – nowe zastosowania elektrodynamiki. *Postępy Fizyki*, 58(6), 242–249. <https://www.ptf.net.pl/PF58/6>.
- [7] Ioannou, K., Koukos, I. (2018). Metamaterials and stealth technology. 7th International Conference on "Experiments/Process/System Modeling/Simulation/Optimization, Athens, 5–8 July 2017. https://www.researchgate.net/publication/322686878_METAMATERIALS_AND_STEALTH_TECHNOLOGY.

Zdalna wieża kontroli ruchu lotniczego

Franciszek Pytka

Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Chełmie

Streszczenie

W artykule przedstawiono zagadnienie zdalnej wieży kontroli ruchu lotniczego. Jest to rozwiązanie nowoczesne, mające na celu ułatwienie kontroli ruchu lotniskowego w obszarach trudnodostępnych. Przedstawiono technologie, dzięki którym możliwe jest sprawne i bezpieczne funkcjonowanie zdalnej wieży kontroli. Przytoczono istniejące przykłady omawianego rozwiązania.

Słowa kluczowe: ruch lotniczy, lotniska, kontrola ruchu lotniczego, wieża kontroli ruchu, zdalna wieża kontroli ruchu

Wprowadzenie

Służba kontroli ruchu lotniczego (ATC)

Służba kontroli ruchu lotniczego (ATC – Air Traffic Control) odpowiada za porządek, bezpieczeństwo oraz sprawne zarządzanie ruchem statków powietrznych [1]. Jej głównym zadaniem jest zapobieganie kolizjom między samolotami na ziemi i w powietrzu oraz zapewnienie płynności ruchu lotniczego. Kontrolerzy monitorują położenie samolotów za pomocą radarów, systemów nawigacyjnych oraz łączności radiowej. Na podstawie aktualnej sytuacji wydają pilotom instrukcje dotyczące wysokości lotu, kursu, prędkości czy procedur startu i lądowania [2].

Zadania ATC

Do podstawowych zadań służb kontroli ruchu lotniczego należą:

- przekazywanie pilotom informacji o pogodzie,
- organizowanie płynnego i bezpiecznego ruchu lotniczego,
- zapobieganie kolizjom między innymi statkami powietrznymi,
- koordynowanie działań służb ratowniczych w sytuacjach awaryjnych,
- zapewnianie odpowiednich separacji między statkami powietrznymi.

W praktyce kontrolerzy podejmują setki decyzji dziennie, dostosowując ruch lotniczy do aktualnych warunków pogodowych, natężenia ruchu oraz ograniczeń przestrzeni powietrznej.

Lotniskowa ATC (TMA/TWR)

W pobliżu lotnisk ruch lotniczy jest szczególnie intensywny, dlatego przestrzeń wokół nich jest podzielona na strefy kontrolowane. Wyróżnia się następujące elementy przestrzeni powietrznej w pobliżu lotnisk.

TMA (Terminal Manoeuvring Area) to obszar otaczający jedno lub kilka lotnisk. W tej strefie kontrolerzy zarządzają



Ryc. 1. Wieża kontroli ruchu na lotnisku Schiphol



Ryc. 2. Centrum operacyjne zdalnej wieży kontroli ruchu

samolotami wykonującymi procedury odlotu i przylotu. Ich zadaniem jest bezpieczne ustawienie statków powietrznych w kolejce do lądowania lub skierowanie ich na odpowiednie trasy odlotowe.

TWR (Tower Control) odpowiada za kontrolę ruchu samolotów oraz pojazdów lotniskowych na pasach startowych i drogach kołowania. Kontrolerzy wydają zezwolenia na start, lądowanie i przemieszczanie się samolotów po lotnisku.

Wieża kontroli ruchu lotniczego

Wieża kontroli ruchu lotniczego jest najbardziej rozpoznawalnym elementem infrastruktury lotniskowej. To z niej kontrolerzy obserwują sytuację na lotnisku i kierują ruchem samolotów oraz pojazdów znajdujących się na płycie lotniska. Kontrolerzy wieżowi utrzymują stałą łączność radiową z pilotami i odpowiadają za bezpieczeństwo wszystkich operacji wykonywanych na lotnisku.

Do najważniejszych zadań wieży kontroli ruchu należą:

- wydawanie zezwoleń na start i lądowanie,
- kontrola ruchu podczas kołowania,
- monitorowanie sytuacji na pasie startowym,
- przekazywanie informacji o warunkach atmosferycznych,
- reagowanie na sytuacje awaryjne.

Przykładem nowoczesnej wieży kontroli ruchu lotniczego jest ta, która znajduje się na lotnisku Amsterdam Airport Schiphol. Należy ona do najwyższych w Europie – ma 101 m wysokości. Obsługuje jeden z największych portów lotniczych na kontynencie, przez który każdego roku przechodzą dziesiątki milionów pasażerów.

Zdalna wieża kontroli ruchu lotniczego

Rzeczywistość sprawia, że na lotnisku nie zawsze konieczna jest obecność kontrolera ruchu. Zdalna wieża kontroli to system umożliwiający monitorowanie lotu z miejsca oddalonego nawet o setki kilometrów od obsługiwanego lotniska. Zamiast obserwować przestrzeń przez okno klasycznej wieży, kontroler korzysta z obrazu przesyłanego w czasie rzeczywistym poprzez zestawy kamer umieszczonych wokół lotniska. Nowoczesne systemy wykorzystują kamery dookólne, mikrofony, radary oraz różnego rodzaju czujniki, które przekazują dane do centrum operacyjnego. Dzięki temu kontroler może śledzić sytuację na lotnisku, obserwując ją na dużych ekranach, z możliwością przybliżania oraz oznaczania samolotów znajdujących się na lotnisku.

Zalety zdalnej wieży kontroli

Jedną z największych zalet technologii zdalnej wieży kontroli ruchu lotniczego jest obniżenie kosztów funkcjonowania lotnisk, szczególnie mniejszych, o znikomym natężeniu ruchu. Budowa oraz utrzymanie tradycyjnej wieży wiąże się z dużymi wydatkami na sprzęt oraz personel. Dzięki zdalnym wieżom możliwe jest prowadzenie kontroli z jednego centrum operacyjnego, które może obsługiwać kilka lotnisk jednocześnie.

Istotną korzyścią jest również poprawa możliwości obserwacji lotniska. Kamery wysokiej rozdzielczości pozwalają na przybliżenie obrazu, widzenie w nocy oraz oznaczanie samolotów. W niektórych przypadkach zapewnia to lepszą widoczność niż w klasycznej wieży, szczególnie w nocy lub gdy widoczność jest gorsza.

Wady

Mimo wielu zalet zdalne wieże kontroli ruchu lotniczego budzą również pewne obawy i wiążą się z wyzwaniami technicznymi. Jednym z najważniejszych problemów jest zależność od stabilnego połączenia. Awaria sieci lub opóźnienie przesyłu obrazu mogłyby utrudnić pracę kontrolerów i wpłynąć na bezpieczeństwo.

Część specjalistów zwraca również uwagę na ograniczenia związane z brakiem fizycznej obecności kontrolera na lotnisku. Bezpośrednia obserwacja otoczenia lub nietypowych sytuacji może być trudniejsza przy korzystaniu wyłącznie z kamer i czujników.

Technologie stosowane w zdalnej wieży kontroli

Kamery wizyjne

Podstawowym elementem każdej zdalnej wieży kontroli ruchu jest system kamer rozmieszczonych wokół lotniska. Najczęściej stosowane są kamery panoramiczne tworzące obraz 360° o wysokiej rozdzielczości (do 4K), posiadające zdolność nawet 30-krotnego zbliżenia. Obraz jest wyświetlany na dużych ekranach w centrum operacyjnym. Dodatkowo stosuje się kamery noktowizyjne oraz termowizyjne. Istnieje również system automatycznego śledzenia obiektów.

Systemy łączności radiowej

Komunikacja między pilotem a kontrolerem odbywa się drogą radiową. Sygnały radiowe odbierane są przez anteny znajdujące się na lotnisku, a następnie przesyłane do centrum kontroli za pomocą łączy transmisyjnych. Kontroler korzysta z tych samych częstotliwości lotniczych co w tradycyjnej wieży, dlatego dla pilota sposób komunikacji pozostaje praktycznie niezmienny.

Systemy bezpieczeństwa

Ze względu na duże znaczenie dla bezpieczeństwa ruchu lotniczego zdalne wieże kontroli ruchu wyposażone są w liczne zabezpieczenia. Najważniejszym rozwiązaniem jest redundancja, czyli stosowanie zapasowych urządzeń i połączeń. W przypadku awarii jednego elementu jego funkcję automatycznie przejmuje system rezerwowy, co pozwala utrzymać ciągłość pracy. W celu wczesnego

wykrycia i zapobiegania niebezpiecznym sytuacjom oraz niezwłocznego poinformowania o nich kontrolera, coraz częściej wykorzystywana jest sztuczna inteligencja.

Przykłady wieży kontroli ruchu lotniczego

Technologia *Remote Tower* jest obecnie rozwijana w wielu krajach Europy i stopniowo staje się częścią nowoczesnej infrastruktury lotniczej. W Szwecji już w 2015 r. uruchomiono pierwszą w świecie zdalną wieżę kontroli ruchu lotniczego dla lotniska Örnköldsvik Airport. Kontrola lotów była prowadzona z centrum operacyjnego znajdującego się w mieście Sundsvall. Obecnie jednym z liderów w zakresie wykorzystania technologii *Remote Tower* jest Norwegia. Firma Avinor stworzyła największe na świecie centrum zdalnych wież kontroli ruchu lotniczego. Z jednego ośrodka obsługiwanych jest wiele regionalnych lotnisk rozmieszczonych w różnych częściach kraju. System ten jest szczególnie przydatny ze względu na duże odległości i trudne warunki terenowe. Ze zdalnych wież korzystają również Niemcy oraz Wielka Brytania. Coraz większe zainteresowanie tą technologią pojawia się także w innych państwach europejskich, ponieważ zdalne wieże są postrzegane jako sposób na obniżenie kosztów oraz zwiększenie efektywności zarządzania ruchem lotniczym.

Podsumowanie

Zdalne wieże kontroli ruchu lotniczego są przykładem tego, jak nowoczesne technologie zmieniają współczesne lotnictwo. Dzięki wykorzystaniu kamer, czujników oraz innych systemów możliwe stało się prowadzenie kontroli lotów bez konieczności obecności kontrolera bezpośrednio na lotnisku. Rozwiązanie to pozwala ograniczać koszty, zwiększać elastyczność pracy oraz poprawia możliwości obserwacji przestrzeni lotniska. Rozwój cyfrowych systemów kontroli pokazuje, że lotnictwo staje się coraz bardziej zautomatyzowane.

Bibliografia:

- [1] Kwasiborska, A. (2016). (red.) *Bezpieczeństwo transportu lotniczego. Wybrane aspekty*. Wydawnictwo Aspra. ISBN 978-83-7549-252-1.
- [2] Szczukowski, M. (2025). *Prawie wszystko pod kontrolą*. Wydawnictwo Awiator.

Tematyka lotnicza w pracach M.T. Hubera (1872–1950)

Konrad Pylak
Politechnika Lubelska

Streszczenie

Artykuł przedstawia działalność i twórczość Maksymiliana Tytusa Hubera, jednego z najwybitniejszych polskich uczonych-mechaników w dziedzinie naukowych podstaw techniki lotniczej. Profesor Huber, pracując na Politechnice Lwowskiej, a później Warszawskiej, miał znaczący udział w tworzeniu podstaw mechaniki lotu i wytrzymałości konstrukcji lotniczych, a następnie twórczo rozwijał te dyscypliny. Przytoczono i pokrótce omówiono te spośród jego publikacji, które były bezpośrednio lub pośrednio związane z techniką lotniczą. Huber łączył tę tematykę ze swoimi głównymi zainteresowaniami – teorią sprężystości, kryteriami wytrzymałościowymi i opisem zjawiska wyboczenia. Podkreślono wszechstronność jego zainteresowań i osiągnięć, podając kilka publikacji spoza głównego nurtu prac naukowca.

Słowa kluczowe: Maksymilian Tytus Huber, mechanika techniczna, technika lotnicza, wytrzymałość konstrukcji lotniczych, stateczność konstrukcji

Wstęp

Życiorys profesora Hubera jest ogólnie znany, dlatego ograniczymy się do krótkiej noty biograficznej. Maksymilian Tytus urodził się w Krościenku w 1872 r. W zależności od miejsca pracy ojca uczęszczał do szkół w Limanowej, Krakowie, Nowym Sączu, Kołomyi i we Lwowie. Studia wyższe ukończył na Wydziale Inżynierii Lwowskiej Szkoły Politechnicznej w 1895 r. Po odbyciu służby wojskowej przez rok studiował w Berlinie, a następnie po roku pracy w administracji krajowej został asystentem w Katedrze Matematyki Lwowskiej politechniki. Od 1899 r. był zatrudniony w Wyższej Szkole Przemysłowej w Krakowie. Podczas pobytu w tym mieście cały czas pracował naukowo. W 1904 r. obronił doktorat w dziedzinie nauk technicznych we Lwowie, z tego samego roku pochodzi jego doniosła praca *Właściwa praca odkształcenia jako miara wytężenia*¹.

1 Praca pod tytułem *Właściwa praca odkształcenia jako miara wytężenia materiału. Przyczynek do podstaw teorii wytrzymałości* jest dostępna jako odbitka z *Czasopisma Technicznego* (wydana w 1904 r. we Lwowie nakładem Towarzystwa Politechnicznego, którego organem było *Czasopismo*). Liczy ona 24 s. autor datował jej ukończenie na październik 1903 r. (wyd. w Krakowie). Odbitkę tę zamieszczają również autorzy książki [37] jako reprint.



Ryc. 1. Prof. M.T. Huber, lata dwudzieste XX w.
(źródło: pl.wikipedia.org)

W 1908 r. Huber powrócił do Lwowa – został mianowany profesorem Szkoły Politechnicznej i kierownikiem Katedry Mechaniki Technicznej. W 1914 r. wybrano go na rektora, jednak wybuch wojny i powołanie do austriackiego wojska uniemożliwiły wykonywanie obowiązków. Po upadku twierdzy w Przemyśle został wzięty do niewoli przez Rosjan. Pobyt w Rosji, głównie w Kazaniu, wykorzystał na naukę języka, zapoznanie się z osiągnięciami rosyjskiej mechaniki i nawiązanie kontaktów m.in. ze Stephenem Timoszenką (przetłumaczył później na jęz. polski jego podręcznik *Wytrzymałość Materiałów*)² i z Borisem Galerkinem.

2 S.P. Timoszenko w swojej *Historii wytrzymałości materiałów* (tłum. Z. Olesiak, H. Olesiak, Wyd. Arkady, Warszawa 1966) poświęcił obszerny fragment hipotezie wytrzymałościowej Hubera, podał wynikające z niej wzory dla szczególnych stanów obciążeń

W 1918 r. profesor powrócił do Lwowa i przejął obowiązki kierownika swojej Katedry. Wkrótce Lwów znalazł się w centrum wydarzeń wojennych, najpierw walk z Ukraińcami o miasto, następnie wojny polsko-bolszewickiej. Mimo to prof. Huber prowadził intensywne prace organizacyjne, był członkiem wielu towarzystw naukowych i ciał doradczych. W 1921 r. został rektorem Politechniki Lwowskiej³ na roczną kadencję. Warto odnotować, że w 1924 r. spotkał się na kongresie z Richardem von Misesem, Heinrichem Henckym i Augustem Föppliem.

W 1928 r. Huber przyjął propozycję przejścia na Politechnikę Warszawską. Pobyt w Warszawie to okres intensywnej pracy naukowej, uczestnictwa w wielu towarzystwach naukowych, kongresach i konferencjach. To czas wykonywania różnorodnych ekspertyz i działalności doradczej, a także opieki nad młodą kadrą naukową. W okresie II wojny światowej brał udział w tajnym nauczaniu i pracował naukowo, także w Zakopanem. W czasie powstania w 1944 r. jego dom w Warszawie został zniszczony, a wraz z nim całe archiwum, w tym kilka nieopublikowanych prac.

W 1945 r. profesor przeniósł się do Gdańska i brał udział w organizacji tamtejszej politechniki. Następnie w 1949 r. wyjechał do Krakowa i podjął pracę na AGH, której doktorem honoris causa był od 1945 r. Zmarł w grudniu 1950 r., został pochowany w grobowcu rodzinnym Godlewskich na Cmentarzu Rakowickim.

Interesujące informacje, zwłaszcza na temat charakteru profesora, jego stylu życia, zamiłowań, zwyczajów, zawiera wspomnienie [34]. Dowiadujemy się np., że Huber był w młodości zaawansowanym kolarzem, dobrze grał w szachy, lubił muzykę poważną i inne dziedziny sztuki. Autor wspomnienia podkreślił jego pracowitość i systematyczność, a także staranność w posługiwaniu się językiem polskim w mowie i piśmie. Podał też kilka anegdot z okresu pracy w Gdańsku, gdy sam był studentem profesora.

Jeśli chodzi o dorobek publikacyjny Hubera, to źródła podają różną liczbę prac – od ponad 200 do 300. W znakomitej książce Zbigniewa Olesiaka i Zbigniewa Engela [37] znajdujemy pełny wykaz zawierający 265 pozycji, z czego zaginęło 18 książek (13 rękopisów oraz innych prac). Wydaje się, że ta liczba jest najbardziej zbliżona do rzeczywistości. Dla porównania – autorzy opracowania [32] podają bibliografię zawierającą 256 prac. Wiele z tych tekstów dotyczyło wprost techniki lotniczej lub mogło mieć zastosowanie w konstrukcji płatowców. W niniejszym artykule podejmiemy próbę omówienia najważniejszych z nich.

W niektórych źródłach i w przekazie ustnym funkcjonuje anegdota o wczesnych poglądach Hubera na możliwości unoszenia się w powietrzu urządzeń mechanicznych. Młody asystent miał wydać własnym sumptem broszurę, w której dowodził, że „nic cięższego od powietrza w powietrzu latać nie może” (cytat według [36]). Zresztą autor tego tekstu pisze, że pod koniec XIX w. był to pogląd dość powszechny.

i wspomniał o wielu jej potwierdzeniach doświadczalnych (por. s. 390–392). Dalej spotykamy również wzmiankę o pracach na temat wytrzymałości płyt ortotropowych.

3 W czerwcu 1921 r. uczelnia oficjalnie otrzymała tę nazwę.



Ryc. 2. Gmach główny Politechniki Lwowskiej przy ul. Leona Sapiehy (Obecnie ulica Stepana Bandery, niedaleko monumentalnego pomnika Bandery i skrzyżowania z ul. Bohaterów UPA). Na parterze budynku mieściła się Katedra Mechaniki prof. Hubera (źródło: [29])

O tej broszurze wspominają również autorzy książki [37]. Podobno, gdy Huber zorientował się, że przedstawione w niej poglądy są mylne, starał się wykupić cały nakład, a niektórzy złośliwi studenci wkładali jej egzemplarze do jego skrzynki pocztowej. Autorzy przywołują w tym miejscu maksymę profesora, według której „nie błąd dyskredytuje człowieka, lecz upieranie się przy błędzie”. Trzeba stanowczo podkreślić, że jego późniejsza działalność, zmierzająca do stworzenia naukowych podstaw lotnictwa i konstrukcji samolotów, stawia tę historię w kręgu marginalnych ciekawostek z życia sławnych ludzi.

Okres lwowski do I wojny światowej

Od 1903 r. i sukcesu braci Wright, poprzez kolejne osiągnięcia konstruktorów i pilotów, m.in. Santos-Dumonta i Blériota, rozpoczęła się era intensywnego zainteresowania lotnictwem. Spośród miast leżących na ziemiach polskich Lwów był największym ośrodkiem rozwoju nowych idei technicznych. Było tak ze względu na działającą tu od kilkunastu lat szkołę politechniczną i aktywne środowisko inżynierskie skupione wokół Towarzystwa Politechnicznego. Dzięki temu miasto stało się miejscem funkcjonowania pierwszego ośrodka polskiej techniki lotniczej. Na ten temat zob. m.in. [35] oraz [38].

Jak już wspomniano, Huber został profesorem mechaniki Lwowskiej Szkoły Politechnicznej w 1908 r. Natomiast w 1909 r. na tej uczelni powstał Związek Awiatyczny Słuchaczy Politechniki we Lwowie, którego kuratorem został właśnie prof. Huber, uczony o światowej już sławie. Celem Związku, który był właściwie kołem naukowym, było rozwijanie wiedzy i umiejętności z dziedziny lotnictwa, konstruowanie statków powietrznych, prace naukowe i doświadczalne. Związek powstał oczywiście na bazie zainteresowań i entuzjazmu młodzieży, ale w jego działalności można dostrzec poważne podejście do tematyki lotniczej i dążenie do oparcia jej na podstawach naukowych. Wydaje się oczywiste, że był to efekt wpływu znakomitego kuratora

i innych profesorów. Od początku postulowano np. powstanie katedry lotniczej i laboratorium aerodynamicznego. Świadczy o tym m.in. notatka w warszawskim „Przeglądzie Technicznym” na temat starań o katedrę i pierwszych niepłatnych wykładów [23]. Mimo poparcia kadry profesorskiej, względy finansowe nie pozwoliły na realizację tego celu. Dopiero w 1928 r. powstało na Wydziale Mechanicznym studium lotnicze, a laboratorium udało się stworzyć dwa lata później.

Jak wspomniano, mimo braku funduszy w różnych miejscach organizowane były wykłady – albo bezpłatnie, albo w ramach skromnych subwencji. Wiadomości o tym docierały też do Warszawy. Dowodem na to jest tekst w „Przeglądzie Technicznym” z informacją, że w Towarzystwie Politechnicznym odbyło się kilka odczytów z awiatyki, m.in. prof. Edwina Hauswalda, inżynierów Władysława Kohmana-Floryańskiego i Edmunda Libańskiego, a także prof. Hubera. Ten ostatni mówił o aspektach energetycznych lotu ptaków i samolotów. Udowadniał, że do unoszenia się ptaka w powietrzu nie jest potrzebna praca, natomiast przemieszczanie się do przodu już jej wymaga. Wspomniano również o tym, że profesor „obecnie dla »Kółka mechaników« na politechnice urządza systematyczne wykłady” [21]. Świadczy to o ówczesnej aktywności Hubera na rzecz popularyzacji techniki lotniczej jako dyscypliny naukowej.

Na uwagę zasługują dwie wystawy lotnicze współorganizowane przez Związek na terenie Politechniki. Pierwsza odbyła się w 1910 r. jako impreza towarzysząca V Zjazdowi Techników Polskich. Wystawiono trzy polskie samoloty, m.in. tzw. monobiplan E. Libańskiego, najbardziej wówczas aktywnego konstruktora samolotów, późniejszego twórcy udoskonalonego samolotu „Jaskółka”. Choć ten udoskonalony statek był trzecim polskim latającym samolotem, należał jednak do grupy konstrukcji, które powstawały głównie w oparciu o ogólną intuicję i wiedzę inżynierską oraz próby eksperymentalne⁴. Wydaje się, że prof. Hubera możemy uważać za twórcę i jednego z pierwszych w Polsce przedstawicieli kierunku zmierzającego do stworzenia teoretycznych podstaw mechaniki lotu i wytrzymałości konstrukcji lotniczych, a także opartego na nich nowego paradygmatu konstruowania statków latających.

Druga wystawa odbyła się w maju 1913 r. i była ekspozycją modeli samolotów, silników, akcesoriów lotniczych i fotografii. Jak stwierdził autor notatki informacyjnej, wiceprzewodniczący Związku, wystawa „skromna pod względem ilości okazów, jednak zdołała obudzić na nowo przytłumione niepowodzeniem inż. Webera zajęcie się lotnictwem i pełną mieć można nadzieję, że owoce zaczętej na nowo pracy już wkrótce »Związek Awiatyczny« zbierać pocźnie” [24]. Autor wspominał również, że wcześniej miało miejsce rozstrzygnięcie konkursu na konstrukcję modelu szybowca, a zgłoszone eksponaty zostały właśnie wykorzystane na wystawie. Prof. Huber był członkiem jury konkursu. Prócz niego



Ryc. 3. Porucznik Huber z ordynansem w twierdzy Przemyśl, 1915 r. (źródło: [37])

gremium stanowili profesorowie E. Hauswald i Z. Sochacki. Jako kryterium oceny przyjęto wynik wzoru, który uwzględniał zasięg, ciężar i wielkość powierzchni nośnych modelu. Pierwsze miejsce zdobyła praca braci Floryańskich.

W lwowskim „Czasopiśmie Technicznym” ukazała się notatka o inauguracji kolejnego roku odczytów (1910) w Krakowskim Towarzystwie Technicznym. Jako pierwszy wystąpił prof. Huber, który mówił o awiatyce. Po uwagach historycznych prelegent przedstawił zarys teorii lotu, z wzorami i obliczeniami, pokazał różne rodzaje samolotów i zilustrował treści przezroczeniami. W zakończeniu dał wyraz – charakterystycznemu dla niego w tamtym okresie – sceptycyzmowi co do możliwości zastosowań samolotów w przyszłości: „samoloty nie będą mieć wielkiego praktycznego znaczenia, a to z tego powodu, że nie mogą być zbyt ciężkie i co za tem⁵ idzie, nie są zdolne do dźwigania znaczniejszych ciężarów lub większej liczby osób”. O umiejętnościach dydaktycznych prelegenta mówi zakończenie notatki: „Gruntowny i piękny wykład Dr. Hubera, wygłoszony z właściwą mu swadą, wywarł na bardzo licznie zgromadzonych słuchaczach, nader miłe i pouczające wrażenie” [22].

Jedną z pierwszych publikacji Hubera z dziedziny mechaniki lotu jest wzmianka krytyczna w „Przeglądzie Technicznym” na temat kryteriów oceny sprawności samolotu. Polemizował w niej z tezami artykułu Stanisława Klimowicza i podał własną metodę, dość zaawansowaną matematycznie [1]. Najpierw jednak stwierdził, że artykuł „zawiera rażące sprzeczności z pojęciami podstawowymi mechaniki”. Jego autor uważał np., że pracą jest iloczyn masy i prędkości, znany jako pęd (ilość ruchu). Tu Huber nawiązał do poprzednich znanych mu prac o tej tematyce i zapowiedział, że pracuje obecnie nad własnym ujęciem podstaw awiatyki i że niebawem opublikuje artykuł na ten temat.

4 Na temat dokonai E. Libańskiego zob. artykuł: Pylak, K. (2024), „Edmund Libański (1862–1928) – próba podsumowania działań i twórczości”. *Analecta. Studia i Materiały z Dziejów Nauki*, 33(2), s. 189–226.

5 W całym artykule zachowano oryginalną ortografię cytowanych prac.



Ryc. 4. Z córką Marią – 1919 r. Maria, córka Hubera z pierwszego małżeństwa, po drugim mężu Rzepińska, zmarła w 1993 r. Była profesorem historii sztuki w Akademii Sztuk Pięknych w Krakowie i wykładowcą UJ (źródło: [37])

Przyznał jednak Klimowiczowi rację co do stwierdzenia, iż o wartości latawca decydują: stateczność, stosunek siły ciągu do ciężaru użytecznego, prędkość lotu i maksymalny zasięg, łatwość sterowania, startu i lądowania oraz koszt podróży w odniesieniu do ciężaru użytkowego i przebytej drogi. Jednakże zapowiedział, że w uwagach polemicznych ograniczy się do zagadnienia zużycia energii.

Przy określaniu wartości siły nośnej i siły oporu, w zależności m.in. od powierzchni skrzydeł, prędkości lotu, kąta pochylenia płatów nośnych, Huber skorzystał z wzorów półempirycznych, zamieszczonych w pracach angielskich. Zaproponował, aby wymaganą powierzchnię płatów wyznaczać z warunku równości siły nośnej i ciężaru, a następnie obliczyć bezwymiarowy wskaźnik równy stosunkowi całkowitego oporu do ciężaru. Wskaźnik ten jest według niego miarą wartości samolotu ze względu na zużytą pracę na pewnej drodze. Jako drugą miarę wartości zaproponował iloraz mocy ciągu przez ciężar, czyli iloczyn poprzedniego wskaźnika przez prędkość. Oczywiście, obie te wielkości powinny być minimalizowane dla lepiej ocenianych samolotów.

Obok uwag Hubera redakcja zamieściła podobnie krytyczne uwagi Henryka Czopowskiego, późniejszego profesora Politechniki Warszawskiej. Warto przy okazji zauważyć, że okres ten charakteryzował się nadzwyczajnym „wysypem” prac z dziedziny techniki lotniczej – książek, broszur i artykułów.

Odnosił ten fakt nasz największy historyk techniki tego okresu, Feliks Kucharzewski, w swoim *Piśmiennictwie* [27].

Do pierwszych publikacji Hubera o tematyce lotniczej należy również przedmowa do pierwszej polskiej książki o lotnictwie autorstwa Jonasza Schnuetzera [2]. Jest to właściwie krótka rozprawka polemiczna, w której autor krytykuje powszechne w literaturze niemieckiej podejście do mechaniki lotu, gdzie „roi się od błędnych pojęć, powstałych przez nieostrożne uogólnianie prawideł znalezionych dla szczególnego przypadku”. Chodziło mu głównie o pojęcie „pracy unoszenia”, której nie da się oddzielić od „ogólnej kwestii zużycia energii podczas lotu”. Do unoszenia potrzebne jest zrównoważenie siły ciężkości samolotu, a obie te siły, jako pionowe, nie wykonują pracy podczas lotu. Siła reakcji jest wytwarzana poprzez przemieszczanie masy powietrza, a do tego potrzebna jest energia, zależna od sposobu ruchu względnego samolotu i powietrza, i to ona jest właściwą praktyczną pracą unoszenia.

Autor przedmowy wspominał o próbach określenia tej pracy, podjętych dużo wcześniej przez Claude’a-Louisa Naviera, a także przez prof. barona Romana Gostkowskiego w stosunku do mechaniki lotu ptaków i owadów. Huber stanowczo odradzał używania pojęcia pracy unoszenia i poszukiwania ogólnego wzoru na jej wartość⁶. Powoływał się przy tym na prace francuskie i angielskie, stwierdził też, że zaletą książki Schnuetzera jest właśnie uwzględnianie tej literatury. Tekst kończy emocjonalne stwierdzenie: „Może nigdy nie odczuwałem tak silnie pragnienia wyzwolenia spod tego wpływu [myśli niemieckiej – przyp. KP], jak od czasu naukowego zajęcia się awiaryką, będącą przeważnie produktem geniuszu francuskiego i angielskiego”.

Należy też wspomnieć, że w tym okresie, a także po powrocie z niewoli rosyjskiej, Huber był aktywnym autorem odczytów wygłaszanych w Towarzystwie Politechnicznym. Wydawnictwo Towarzystwa [28] podaje dwa tematy jego wystąpień dotyczących lotnictwa: „Z mechaniki sztucznego lotu” (1909 r.) oraz „Postępy w lotnictwie” (1911 r.). Inne prace omawiały problemy wytrzymałościowe, a niektóre miały charakter popularnonaukowy. W latach 20. profesor był też członkiem władz lwowskiego oddziału Towarzystwa Politechnicznego.

W 1912 r. ukazał się artykuł Hubera podsumowujący aktualny stan i dalsze możliwości lotnictwa [3]. Tu znów możemy zauważyć spadek poziomu sceptycyzmu autora wobec możliwości praktycznego wykorzystania lotnictwa (jeszcze niedawno traktowano je głównie jako dziedzinę ekstremalnego sportu). Przede wszystkim wzrastał wciąż

⁶ Tu Huber nawiązał do, trwającej od ostatniej dekady XIX w. do pierwszych lat XX w., dyskusji nad teorią ortopteryczną lotu i pojęciem pracy unoszenia, w której ze strony polskiej brali udział m.in. R. Gostkowski, K. Monikowski, Z. Straszewicz i H. Czopowski. Dyskusję tę obszernie zrelacjonował H. Buzun w artykule: „Spór o sposób obliczania pracy mechanicznej potrzebnej do utrzymania ciała w powietrzu”. *Kwartalnik Historii Nauki i Techniki*, 1959 4(4), s. 675–711. Przytoczył też wcześniejsze uwagi S. Drzewieckiego, zbliżone do przedstawionego tu stanowiska Hubera.

stopień wojskowego wykorzystania samolotów. Miała na to wpływ trwająca wówczas wojna włosko-turecka o Libię⁷, w której brali już udział lotnicy. Samoloty stosowano w misjach wywiadowczych, ale także do zrzucania pocisków na pozycje nieprzyjacielskie. Na podstawie wiadomości z frontu autor artykułu przewidywał, że niebawem wojna w powietrzu stanie się rzeczywistością, a nie tylko fantazją literacką⁸. Natomiast w zastosowaniach cywilnych samolot był ciągle jeszcze zbyt drogi i mało efektywny w stosunku do innych środków transportu. Na poparcie tej tezy autor przeprowadził analizę porównawczą kilku wskaźników eksploatacyjnych. Jedyną przewagą samolotu była prędkość. To zaś stwarzało perspektywę zastosowań pocztowych i dla klientów transportowo-biznesowych.

Na tym etapie rozwoju techniki lotniczej autor uznał więc za istotne zagadnienie zwiększania prędkości – głównie drogą zmian konstrukcyjnych płatu i silnika oraz zmniejszenia oporu czołowego ruchu. „Jak największa zwartość budowy, gładkość powierzchni zewnętrznych, unikanie nieosłoniętych sieci drutów i kratownic we wszystkich kierunkach i zaostrenie wszystkich części nie od strony dzióbka, lecz od strony ogona; oto zbawienne zasady”. O słuszności tych postulatów oraz m.in. o wyżej wspomnianych prognozach co do zastosowania lotnictwa w przyszłej wojnie wspomina autor książki [33]⁹. Zdaniem Hubera powiększanie prędkości lotu zwiększało bezpieczeństwo – ze względu na osłabianie groźnego dla samolotu wpływu wiatru. Jednakże wynikał stąd znaczący problem konstrukcyjny: dostosowanie podwozia do konieczności zaabsorbowania przez nie przy lądowaniu energii kinetycznej, rosnącej wraz z prędkością. Niemniej jednak autor przewidywał, iż w ciągu kilku lat maksymalna prędkość lotu może wzrosnąć do 150 km/h, natomiast zasięg – do 1000 km. Prognoza była dość ostrożna, bo uzyskanie tych osiągnięć nastąpiło już kilka miesięcy później.

W maju 1913 r. działalność Związku Awiacyjnego została uznana na forum ogólnopolskim. Wychodzące w Warszawie od 1911 r. czasopismo „Lotnik i Automobilista” zostało uznane przez Związek za oficjalny jego organ¹⁰. Wydaje się, że rola prof. Hubera, który rok wcześniej opublikował w piśmie swój artykuł, mogła być istotna przy podjęciu tej decyzji. Myśl techniczna pokonywała kordony granic zaborów. Fakt połączenia sił Związku z możliwościami czasopisma był potencjalnie korzystny dla obu stron. Redakcja



Ryc. 5. Karykatura profesora Hubera – 1948 r. (źródło: [37])

liczyła na podniesienie poziomu pisma przez publikację prac profesorów lwowskich – tu wymieniano m.in. nazwisko Hubera [25]. Związek był wówczas jedyną organizacją lotniczą na ziemiach polskich, a „Lotnik i Automobilista” jedynym czasopismem o tym profilu. Dlatego taka popularyzacja prac Związku poza granicami Galicji była dla niego bardzo korzystna.

Odtąd każdy numer *Lotnika* zawierał informację o Związku, podawał nazwiska kuratora (prof. M.T. Huber) i reprezentantów władz, a także członków honorowych (Stefan Drzewiecki, Zygmunt Sochacki) oraz wspierających (m.in. profesorowie Kazimierz Bartel i Wacław Suchowiak). W niektórych numerach wymieniano wszystkich członków zwyczajnych (ponad 20 osób) z podziałem na sekcje. Prof. Huber kierował też sekcją prasową odpowiedzialną za publikację. Należy więc sądzić, że miał swój udział w doprowadzeniu do ukazywania się w prasie kolejnych artykułów, relacji i notatek członków Związku.

W tym kontekście warto zwrócić uwagę na jeden z numerów „Lotnika...”, w którym została umieszczona notatka z zebrania podsumowującego działalność Związku w 1913 r. [26]. Prowadzący spotkanie kilkakrotnie wymieniał prof. Hubera jako osobę wspomagającą działalność Związku, szczególnie w zakresie ułatwiania młodym członkom publikowanie prac. Wspominał również o planach dydaktycznych na najbliższy czas. Otóż zamiary Związku to uruchomienie teoretycznego kursu lotniczego o tematyce: rozwój lotnictwa, mechanika lotu, konstrukcja płatowców i silników; kursu stanowiącego przygotowanie do wykładów prof. Hubera „Aerodynamika w zastosowaniu dla lotnictwa”.

7 Jeden z konfliktów poprzedzających wybuch I wojny światowej.

8 Na wizję Hubera opisaną w artykule zwracają uwagę również autorzy książki [37].

9 Książka E. Jungowskiego jest interesującym kompendium wiedzy o początkach lotnictwa w ogóle, a w Polsce w szczególności. Autor poświęcił wiele uwagi próbom naukowej refleksji, praktycznego konstruowania i lotów pierwszych statków powietrznych. Jeśli chodzi o ziemię polską, skupił się głównie na sytuacji i wydarzeniach w Warszawie i Królestwie, traktując Galicję dość marginalnie (choć wspominał o Związku Awiacyjnym i roli prof. Hubera). Zastęgą autora jest niewątpliwie szczegółowa prezentacja biografii i działalności S. Drzewieckiego, Cz. Tańskiego, W. Jarkowskiego i in.

10 Por. oddzielne opracowanie na temat tego pisma: K. Pylak, „Czasopismo „Lotnik i Automobilista” (1911–1914) – prekursor popularyzacji lotnictwa w Polsce”. Zob. *Technika Lotnicza i Astronautyczna*, 2024, nr 2, s. 48–59.

Sam Huber miał krótkie wystąpienie, w którym podkreślił fakt owocnej pracy Związku, wykonanej mimo przeszkód politycznych i ekonomicznych oraz ogólnej opinii, że Polacy w tej sytuacji nie mogą nawet marzyć o częstce osiągnięć, jakie mają w lotnictwie Francuzi. Według słów profesora, do sukcesów Związku wystarczyła „pełna zapału i wytrwałości” praca. Przemowę zakończyły życzenia, by Związek był „tem ogniskiem, w którym topić będziecie szlachetny kruszec waszych talentów i prac na wielkie i potężne dzieło”. Finałem spotkania był wykład doc. W. Floryańskiego „Stan lotnictwa w dobie obecnej”.

Pod koniec tego okresu Huber powrócił do zainteresowania teorią sprężystości i mechaniką budowli. Ogłosił kilka obszernych publikacji z tej dziedziny. W „Przeglądzie Technicznym” zamieścił kilkuczęściowy artykuł na temat metodyki obliczeń ram [5]. Zaawansowana matematycznie praca doprowadziła do zestawu wzorów i wykresów, pozwalających na wyznaczenie sił wewnętrznych i przekrojów elementów niewyznaczalnej statycznie ramy prostokątnej, złożonej z belki i dwu słupów, podpartej dwoma stałymi podporami przegubowymi. Autor rozpatrzył różne warianty proporcji wymiarowych belki i słupów oraz możliwe rodzaje obciążeń zewnętrznych – siły skupione i obciążenia ciągłe. Przy obliczeniach wziął pod uwagę odkształcenia elementów poddanych złożonym stanom naprężeń, a nawet wpływ zmian temperatury.

Ważnym tematem prac profesora z zakresu teorii sprężystości była teoria płyt prostokątnych. W 1914 r., również w „Przeglądzie...”, ogłosił czteroczęściowy artykuł o wytrzymałości takich ustrojów [6]. Rozszerzenie tej pracy, poświęcone płytom żelbetowym, ukazało się w tym samym roku w „Czasopiśmie Technicznym” (obecnie dostępne jest ono w postaci odbitki [7], którą w formie reprintu podają też autorzy książki [37]). Po I wojnie światowej Huber powrócił do tej tematyki, publikując znów obszerne prace o płytach różnokierunkowych [8]. Napisał, że powstały one w latach, w których przebywał w niewoli rosyjskiej.

Okres warszawski

O pracach z teorii ram i płyt wspominamy dlatego, że profesor stosował później opracowane wtedy podejście i metody teorii sprężystości do analizy wytrzymałościowej elementów konstrukcji lotniczych.

Przykładem jest np. artykuł o metodzie analizy wytrzymałościowej belki podłużnicy skrzydła [12]. Huber rozważył w nim przypadek obciążenia i odkształceń pojedynczego przęsła podłużnicy skrzydła, traktowanego jako belka. Do zagadnienia podszedł „staranniej niż to uczyniono dotychczas”. Według niego naprężenia nie są liniowo proporcjonalne do obciążeń i tu nie da się określić współczynnika bezpieczeństwa jako stosunku naprężenia niebezpiecznego do użytkowego. Naprężeniem niebezpiecznym dla metali jest granica plastyczności albo granica sprężystości. Artykuł zaopatrzone w obszerny dodatek zawierający tablice wartości funkcji pomocniczych, które wprowadził autor do wyprowadzonych wzorów. W zakończeniu wspominał,

że wzory i tablice umożliwiają dokładne obliczenia podłużnic skrzydeł dwupłatów „z tym samym prawie nakładem pracy, co przy zastosowaniu w pierwszym przybliżeniu zwykłego równania trzech momentów”.

Innym przykładem jest opublikowany niedługo później artykuł o wytrzymałości konstrukcji skrzydła jednopłata [13]. Autor, podejmując ten temat (i nie odnosząc się do poprzednio omówionego), stwierdził, że dotychczas stosowane metody obliczeń obciążeń i odkształceń całych belek podłużnic, stanowiących główny element szkieletu skrzydła, są zbyt uproszczone i prowadzą do przewymiarowania konstrukcji ze szkodą dla jej ciężaru. W metodach tych traktowano podłużnice jako utwierdzone niezależne belki, bez uwzględnienia sztywnych, łączących je żeber. Nie brano pod uwagę faktu współdziałania podłużnic objawiającego się przenoszeniem każdego obciążenia poprzez żebra na obie (lub więcej) podłużnice.

Huber przedstawił zatem obszerne, zaawansowane matematycznie opracowanie tego zagadnienia z zastosowaniem metody Castigliano, a jego przewodnią ideę zawierała cytowana praca Theodore von Kármána i jego własny artykuł sprzed kilku lat. Profesor wyprowadził najpierw układy równań dla przypadku zakładającego sztywność żeber, a następnie uwzględnił ich podatność na skręcanie. Zastrzegł na końcu, że wprowadzenie w jego modelu założono równoległość podłużnic, jednakże drobne uzupełnienie pozwalało zastosować metodę także do, zwykle spotykanej, niewielkiej zbieżności osi podłużnic.

We wprowadzeniu do kolejnego artykułu [16] Huber stwierdził, że przy okazji obliczeń kratownic nie mówi się zwykle o sztywności skrętnej. Jednakże dobrzy konstruktorzy zdają sobie sprawę z tego, że wielkość ta wpływa na sztywność i wytrzymałość całej konstrukcji. Ma to szczególne znaczenie przy obliczaniu kadłubów kratowych samolotów, gdy ważna jest lekkość. Autor rozpatrzył przypadek, w którym dla głównych prętów ściskanych wprowadza się dodatkowe skrzyżowanie z prętem pomocniczym zginanym, stanowiącym podparcie pręta głównego i zwiększającym jego odporność na wyboczenie.

Tematyka wyboczenia prętów osiowo ściskanych była obecna w publikacjach Hubera praktycznie przez cały okres aktywności. Opis i matematyczne ujęcie zjawisk towarzyszących takiemu obciążeniu elementów budowli czy konstrukcji lotniczych były jednym z głównych tematów badawczych jego prac. Zresztą, w latach 20. i 30. zagadnienia związane ze zjawiskiem wyboczenia interesowały wielu uczonych i były często tematem polemik. Wystarczy przejrzeć wykaz prac, np. z roku 1930, gdzie obok Hubera publikowali swoje artykuły, recenzje i repliki Kazimierz Vetulani, Włodzimierz Burzyński, Leon Karasiński¹¹ i in. W dalszej części przedstawimy skrótowo główne myśli obszernego artykułu

11 Leon Karasiński, profesor mechaniki na Wydziale Inżynierii Lądowej PW. Wydaje się, że był on głównym oponentem Hubera wśród uczonych zajmujących się wyboczeniem. O emocjach i intensywności tych polemik świadczy choćby pismo dziekana wydziału, wyrażające w imieniu grona profesorów „ubolewanie z powodu użycia w opinii przez prof. M.T. Hubera wyrażań, nie liczących

z 1934 r. [17], który jest rodzajem podsumowania własnych opracowań profesora, z uwzględnieniem rezultatów prac innych autorów i dyskusji z ich tezami. Wstęp zawiera odwołanie do trzydziestoletniego okresu zainteresowania tematyką na tle sześćdziesięciolecia prac o wyboczeniu w literaturze polskiej.

Po obszernym wprowadzeniu w specyfikę stanu ściskania, wyjaśnieniu pojęć smukłości, wartości krańcowej i niebezpiecznej obciążeń oraz siły wynikającej ze wzoru Eulera Huber stwierdził, że ściskany pręt sprężysty ma dwie możliwe postacie równowagi: prostą – dla obciążenia mniejszego od siły krytycznej – oraz prostą i wygiętą – dla siły większej. Siła krytyczna nie jest równa sile eulerowskiej, gdy własności materiału nie spełniają prawa Hooke’a albo gdy występują odkształcenia trwałe. Równowaga prosta jest dla obciążenia większego od krytycznego równowagą niestabilną – najdrobniejszy zakłócający ją czynnik powoduje wygięcie i przejście do równowagi stałej – wygiętej. Tu Huber podjął dyskusję z autorami, którzy twierdzili, że gdyby zostały usunięte niedokładności wykonania i obciążenia pręta, nie nastąpiłoby wyboczenie. Zaproponował też, aby nie używać określenia „wyboczenie” do zgięcia pręta ściskanego mimośrodowo. Zatem „można by powiedzieć, że wyboczenie czyste nie zachodzi nigdy w rzeczywistości [...]”. Ale czy tezy tego rodzaju mogą przynieść pożytek nauce? Przecież wszystkie mieszczą się w zasadzie filozoficznej, [...] że zupełne poznanie przyrody jest nieskończenie odległym, nieosiągalnym celem badania ludzkiego”.

Podsumowując rozważania, profesor stwierdził, że „niestabilność równowagi prostej postaci pręta jest przeto esencjonalną częścią zjawiska wyboczenia”, zarówno sprężystego, jak i niesprężystego. I dodał, iż „wielka naukowa i praktyczna doniosłość pojmowania wyboczenia jako zjawiska niestabilności równowagi postaci tkwi jeszcze w tym, że prowadzi do ogólnej prostej metody oceny wytrzymałości na wyboczenie w bardzo licznych przypadkach złożonych”.

W drugiej części artykułu Huber zajął się głównie zakresem wartości smukłości mniejszych od granicznej. Nawiązywał do swoich wcześniejszych tekstów, wspominał też o pracach Feliksa Jasińskiego i wykazał, że nowsze wzory niemieckie są niewielką modyfikacją wzorów tego autora. Profesor wyprowadził także wzór na naprężenia niebezpieczne w zależności od smukłości. Stwierdził, że „wzory tego typu już mają zastosowanie w konstrukcjach lotniczych, [...] tylko najdalej posunięta dokładność obliczenia może zapewnić wymaganą lekkość konstrukcji lotniczych przy określonej pewności”. Zastrzegł, że w rozważaniach nie uwzględnił ściskania prętów cienkościennych stosowanych dla ich lekkości przy dużym momencie bezwładności przekroju. Mają one małą sztywność poprzeczną, a odporność na wyboczenie zależy od wielu czynników. Radził, aby do oceny wytrzymałości stosować w tym przypadku metody doświadczalne i zakończył tekst życzeniem, aby „prace laboratoryjne,

wykonywane w naszej Politechnice, przyczyniły się do wyjaśnienia kwestii wyboczenia »niesprężystego«”.

Prócz kilku podręczników z mechaniki i wytrzymałości materiałów wśród dzieł profesora mamy także podręcznik statyki lotniczej [14] – skrypt, opracowany na podstawie jego wykładów¹². W ramach podziękowań wydawcy wspomnieli o tym, że skrypt przejrzał i uzupełnił sam Huber. Możemy zatem traktować tę pozycję jako autoryzowaną przez niego pracę. Już we wstępie zwraca się uwagę na odmienną paradygmatu konstruowania samolotów w stosunku do innych maszyn. Główną cechą konstrukcji lotniczych powinna być lekkość. To wymaganie ma jednak swoje ograniczenia, konieczne jest bowiem zapewnienie stateczności elementów konstrukcji, co jest szczególnie istotne w przypadku konstrukcji cienkościennych. Stąd podany na wstępie przykład wyboczenia prętów ściskanych i wzoru Eulera na siłę krytyczną, wprowadzenie pojęcia smukłości i współczynnika pewności.

Cały skrypt, bez załączników, liczy ponad sto stron. Został podzielony na 8 rozdziałów. W rozdziale pierwszym: „Lekkość konstrukcji”, zwrócono uwagę na różnice w określaniu ciężaru elementów przy różnych stanach obciążeń i zastosowanych materiałach, przy czym wielkością wymiarującą jest oczywiście dopuszczalne naprężenie. Autor zastosował interesujące podejście – utworzył odpowiednie współczynniki lekkości zawierające zarówno ciężar właściwy, jak i naprężenia dopuszczalne. Następnie zestawiał w tabelach ich wartości dla poszczególnych stanów obciążeń i materiałów. Z porównania wyciągnął wniosek, że według przyjętego kryterium najłżejszym materiałem było drewno, a zaraz po nim uplasował się dural.

Rozdział drugi poświęcony został obliczeniom wytrzymałościowym nitowanych belek teowych. W rozdziale trzecim autor zajął się obliczeniami poddanych skręcaniu prętów drażonych o zmiennym obrysie i grubości ścianki przekroju. Wykorzystał analogię pomiędzy rozkładem naprężeń w takim przekroju a rozkładem prędkości hipotetycznej cieczy idealnej, która płynęłaby w przewodzie o kształcie tego przekroju. Po wyprowadzeniu odpowiednich wzorów zastosował je w przykładach pierścienia kołowego i prostokątnego.

Dość obszerny rozdział czwarty został poświęcony konstrukcjom kratowym. Wyróżniono kratownice wyznaczalne statycznie oraz niewyznaczalne wewnętrznie i zewnętrznie. Dla wyznaczalnych autor przypomniał metodę Rittera i Cremony, a bliżej omówił metodę Culmanna. Następnie zajął się metodami wykreślnymi i analitycznymi wyznaczania przemieszczeń węzłów. Rozdział kończy

z powagą krytyki naukowej”. Zob. *Czasopismo Techniczne* (1930), 48(5), s. 96.

12 Skrypt opracował Leszek Mieczysław Dulęba, wówczas student, a później zaśluzony konstruktor samolotów, od 1958 r. profesor PW, współpracownik m.in. prof. Franciszka Misztala. Szczególnie cenne były skrypty Hubera wydane zaraz po wojnie, gdy brakowało wszelkiej literatury, np. „Stereomechanika techniczna”, t. II – Gdańsk 1947, t. III – Gdańsk 1948, cz. I – Gdańsk 1949. Ich rękopisy powstawały w czasie wojny, uległy też częściowym zniszczeniom. W opracowaniu [32] prof. Adam Tadeusz Troskoleński napisał, że dla Hubera najsłabszą stratą był rękopis największego dzieła „Mechanika techniczna ciał stałych”, owoc kilkuletniej pracy.

rozwiązanie zagadnienia wyznaczania sił w prętach dla układów zewnętrznie i wewnętrznie niewyznaczalnych.

W rozdziale piątym możemy się zapoznać z metodą wyznaczania naprężeń i odkształceń w belce jednocześnie zginanej i rozciąganej lub ściskanej. Autor zastosował podejście energetyczne i rozważył przykłady belek wyznaczalnych i niewyznaczalnych statycznie, o różnorodnych obciążeniach i sposobach podparcia. Kolejny rozdział to obliczenia prętów ściskanych. Tu autor sięgnął do podstaw zagadnienia, podając i omawiając wzór Eulera, Tetmajera i Johnsona-Ostenfelda. Powtórzył też idee znane z wcześniejszych prac. Mimo iż „nie ma ani prętów jednorodnych, ani prostoosio-owych, ani zupełnie centralnych obciążeń”, zajął się przede wszystkim przypadkami teoretycznymi. Podkreślił, że „wzór Eulera podaje dokładną wartość obciążenia krytycznego tylko dla słupów o smukłości $s > s_{gr}$ ”. Pokazał zastosowanie energetycznego kryterium równowagi, zajął się też statecznością prętów o przekrojach zmiennych, prętów drążonych i obciążonych mimośrodowo.

W rozdziale siódmym podana została metoda obliczeń belek wieloprzęśtowych zginanych siłami poprzecznymi i jednocześnie ściskanych. Podkreślono, że w ten sposób są obciążone podłużnice dwupłatów i jednopłatów z zastrzałami, a podana metoda jest najdokładniejsza ze stosowanych w praktyce. Autor rozważył najpierw belkę jednoprzęsłową, następnie przeszedł do belek wieloprzęśtowych. Doprowadził wzory do takiej postaci, że zawierały wprowadzone funkcje pomocnicze, a ich wartości zostały obliczone, stabelaryzowane i umieszczone w wielostronicowym załączniku, podobnie jak w artykule [12]. Ostatni rozdział skryptu został poświęcony obliczeniom naprężeń i odkształceń oraz stateczności cienkich płyt.

Środowisko uczonych – uczniów i przyjaciół, skupionych w Polskiej Akademii Nauk, podjęło wkrótce po śmierci M.T. Hubera inicjatywę opracowania i wydania jego prac zebranych. Realizacją przedsięwzięcia zajęła się komisja pod przewodnictwem Witolda Nowackiego i Wacława Olszaka. Wydano pięć tomów pism, przy czym tom I zawiera wprowadzenie, charakterystykę twórczości i opracowania charakteryzujące osiągnięcia profesora w poszczególnych dziedzinach [32]. Jedną z dwunastu wyróżnionych dziedzin jest tematyka lotnicza przedstawiona w tekście „Zagadnienia konstrukcyj lotniczych” (s. 114–120). Autorem tego opracowania jest prof. Z. Brzoska¹³. Ze względu na jego autorytet i pozycję naukową na Wydziale Mechanicznym Energetyki

i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej omówimy szerzej tę pozycję.

Autor wspominał o początkach zainteresowania Hubera lotnictwem we Lwowie, ale stwierdził, iż właściwy okres jego pracy w obszarze konstrukcji lotniczych zaczął się dopiero po przeniesieniu do Warszawy. Huber miał swój udział w utworzeniu Państwowych Zakładów Lotniczych i Instytutu Technicznego Lotnictwa. Podstawowym problemem okazał się wówczas brak profesjonalnego personelu inżynierskiego i konieczność podnoszenia kwalifikacji u osób już pracujących w lotnictwie. Z tego względu profesor Huber zajął się w szczególny sposób dydaktyką, prowadził wykłady ze statyki lotniczej dla studentów Oddziału Lotniczego. Zwracał szczególną uwagę na pojęcie współczynnika bezpieczeństwa, wymóg lekkości konstrukcji i stateczność konstrukcji prętowych. W tym kontekście autor wymienił pracę [12] oraz skrypt [14]. Zagadnienia stateczności prętów były ważne w konstrukcji płatowców zastrzałowych, wypartych następnie w dużej mierze przez konstrukcje skrzydeł wolnonośnych. Model belki ściskanej i jednocześnie zginanej obciążeniem ciągłym powstał w wyniku analizy pracy dźwigar górnego skrzydła dwupłata (obciążenia prostopadłe do osi pochodzą oczywiście od sił aerodynamicznych).

Brzoska omówił także pracę [13] o wytrzymałości podłużnic skrzydeł wspornikowych. Modelem był układ dwóch dźwigarów, połączonych kilkoma równoległymi żebrami o znacznej sztywności. Układ taki zapewnia przejmowanie obciążenia jednego z dźwigarów przez drugi, zaś stopień jego niewyznaczalności jest równy liczbie żeber. Omówienie pracy jest zbliżone do podanego przez nas wyżej. Z. Brzoska stwierdził ponadto, że podana metoda miała jeszcze wówczas pełną wartość praktyczną, a celem artykułu Hubera było raczej wprowadzenie do literatury polskiej wyników otrzymanych przez Kármána, a nie rozwiązanie nowego problemu.

Pośród wszystkich prac Hubera w dziedzinie konstrukcji lotniczych za najbardziej oryginalną Z. Brzoska uznał „Zginanie belek prostych o przekrojach wiotkich”¹⁴. Autor opracowania zajął się zagadnieniem naprężeń wtórnych, które pojawiają się w belce w następstwie zakrzywienia się jej osi w wyniku odkształceń. Naprężenia te, nieistotne dla belek o przekrojach zwartych, w przypadku belek cienkościennych wywołują znaczące zginanie w kierunku poprzecznym, przy czym wartość tych naprężeń może być tego rzędu co naprężenia zasadnicze. Huber rozpatrzył przypadki belek o przekrojach skrzynkowych i pierścieniowych. Stwierdzono, że problemy tego rodzaju mogą się pojawić w analizie wytrzymałościowej profili skrzydeł, zwłaszcza dla prędkości zbliżonych do prędkości dźwięku.

Kolejna praca „W sprawie tzw. współdziałania podłużnic w skrzydłach jednopłatów” ukazała się również w wydawnictwie wewnętrznym Instytutu¹⁵. Dotyczyła badania modelu belki dwudźwigarowej o zbieżnych dźwigarach,

13 Prof. dr inż. Zbigniew Brzoska (1916–1987), absolwent Oddziału Lotniczego Wydziału Mechanicznego Politechniki Warszawskiej, współpracował z Huberem w Laboratorium Wytrzymałości Materiałów PW przed wojną i w jej trakcie, rozpoczął pracę nad doktoratem w 1942 r. i obronił go już po wojnie, w 1946 r. w Gdańsku. Tematyką pracy była wytrzymałość powłok cylindrycznych, promotorem był prof. Huber. Z. Brzoska był później wieloletnim dziekanem Wydziału Lotniczego i Wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa PW oraz kierownikiem Katedry i Zakładu Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji Lotniczych. Pracował też w Instytucie Lotnictwa. Był promotorem doktoratów kilku późniejszych profesorów.

14 Praca została zamieszczona w „Sprawozdaniach Kwartalnych Nr 3 Instytutu Badań Technicznych Lotnictwa”, Warszawa 1930.

15 „Sprawozdanie Nr 2 IBTL”, Warszawa 1931. Uwagi jak w poprzednim przypisie.

połączonych kilkoma żebrami. Rozwiązanie rozpoczęła analiza modelu uproszczonego z jednym żebrzem – siły wewnętrzne wyrażono w funkcji znanego obciążenia i wielkości statycznie niewyznaczalnych. Tak jak poprzednio, zastosowanie zasady minimum energii pozwoliło rozwiązać zagadnienie. Jak stwierdził Z. Brzoska, znaczenie pracy „dla rozwoju konstrukcji lotniczych polega może nie tyle na jej wartości naukowej, ile na jasnym i dostosowanym do poziomu inżyniera przedstawieniu tego problemu”.

Profesor omówił jeszcze jedną pracę opublikowaną w materiałach Instytutu: „Wymiarowanie prętów osiowo ściskanych o stałym przekroju w konstrukcjach lekkich”¹⁶. Punktem wyjścia było tu podejście nieznane wcześniej w literaturze polskiej. Efektem pracy było m.in. przedstawienie na jednym wykresie przebiegu naprężeń krytycznych dla rodziny profili podobnych geometrycznie. Pozwalało to na bezpośrednie wykorzystanie wyników przez konstruktora w procesie doboru wymiarów prętów ściskanych. Publikację tę autor określił jako „ostatnią pracę Hubera o zakresie ściśle lotniczym”. Wspomniał też o szeregu prac profesora, które wiążą się pośrednio z zagadnieniami wytrzymałości konstrukcji lotniczych.

Istotną cechą metodologii rozwiązywania zagadnień statycznie niewyznaczalnych było stosowanie metod energetycznych. Huber często kierował swoje opracowania do inżynierów i z tego względu starał się o jak najprostsze metody rozwiązań, uważając, że są one jedynie narzędziem umożliwiającym osiągnięcie pożądanego rezultatu przy określonych założeniach początkowych. Kończąc artykuł, Z. Brzoska stwierdził, że omówione pozycje nie wyczerpują tematu uczestnictwa profesora Hubera w pracach nad rozwojem polskiego lotnictwa. W dalszym ciągu pozostawał nauczycielem akademickim, a ponadto współpracował twórczo z Wytwórnią PZL i Instytutem Badań Technicznych Lotnictwa.

Inne obszary działań

Maksymilian Tytus Huber jest głównie znany z genialnych prac w dziedzinie wytrzymałości materiałów, a przede wszystkim z rozpowszechnionej w mechanice tzw. hipotezy wytrzymałościowej Hubera o właściwej pracy odkształcenia postaciowego jako miarze wyczerpania materiału. Wspomniemy jedynie, że o tej hipotezie pisał i później. W 1948 r. wydał ważną broszurę [20]¹⁷ podsumowującą efekty prac własnych i innych uczonych, którzy starali się znaleźć formułę najbardziej adekwatnego kryterium oceny stanu wyczerpania materiału poddanego różnym obciążeniom. Powinno ono uwzględniać własności mechaniczne materiału oraz stopień bezpieczeństwa konstrukcji. Omówił najpierw pierwsze kryteria wytrzymałościowe, a następnie przeprowadził krytykę hipotezy Mohra. Swoją zaś nazwał hipotezą energetyczną

z 1904 r. i podał jej ograniczenia – zastosowanie jedynie do izotropowych materiałów elastoplastycznych, takich jak np. stale konstrukcyjne. Jako dowód przytoczył prace potwierdzające doświadczalnie to kryterium. Odnośnie do prób stworzenia hipotezy słusznej także dla materiałów kruchych profesor wyraził swój sceptycyzm – nie cytował prac na ten temat „z powodu przekonania, że znalezienie ogólnego kryterium wytrzymałościowego jest beznadziejne”. Mimo wszelkich wątpliwości i zastrzeżeń właściwych dla dokładnego i merytorycznego podejścia profesora, stwierdził na koniec, iż kryteria oparte na hipotezach „mają charakter prawideł praktycznych”, poświadczonych i ważnych w praktyce inżynierskiej.

Powyżej wykazaliśmy, że również lotnictwo i budowa statków powietrznych były obszarem jego zainteresowań, a nawet pasją. Jednakże wszechstronność umysłu i różnorodność podejścia do nauki i opisu rzeczywistości znajdowały wyraz także w innych publikacjach. O kilku kierunkach jego prac naukowych wspomniemy poniżej.

W bogatej twórczości Hubera są również pozycje świadczące o tym, że nieobca mu była refleksja z dziedziny metodologii nauk oraz filozofii techniki i nauk technicznych. W wykładzie inauguracyjnym z 1912 r. zajął się problemem relacji między teorią a praktyką w działalności technicznej [4]. W odniesieniu do tej relacji postawił tezę, „że doświadczenie jest źródłem wszelkiej wiedzy przyrodniczej” i „że tylko umysł wyszkolony na naukowych teoriach i przesiąknięty filozofią przyrody może w sposób pewny i jasny interpretować wyniki doświadczeń. Dla takiego umysłu nie ma przeciwieństwa między teorią a praktyką”.

Gromadzenie wyników doświadczeń prowadzi do uogólnień i formułowania praw ilościowych, które stanowią podstawę teorii. Im doskonalsza teoria, tym mniej ma takich praw. Pod tym względem najdoskonalszą nauką jest według Hubera mechanika, którą Newton oparł na trzech zasadach, a jego następcy – Mach i Hertz – zaproponowali redukcję liczby zasad do dwóch, a nawet jednej, przy twórczym wykorzystaniu matematyki. Jeśli chodzi o koncepcję zasady względności i opinie o kryzysie i końcu mechaniki klasycznej, autor stwierdził, że nowa teoria będzie tylko rozszerzeniem starej, a „teorie matematyczne klasycznej mechaniki będą po wieki wieków pewnymi przewodniczkami inżyniera”. O jego intelektualnym zbliżeniu do teorii względności, które nastąpiło kilka lat później, wspomniemy w dalszej części rozdziału.

Huber podał i omówił kilka przykładów istotnego wpływu nauki na twórczość inżynierską w różnych dziedzinach. Wskazał na konieczność częstej rezygnacji z zaawansowanej ścisłości rozwiązania i celowość pomijania czynników drugorzędnych ze względu na prostotę wyniku i możliwości inżynierskich zastosowań. Jednakże są przypadki, w których trudno na początku orzec o ważności poszczególnych czynników. Tu podał przykład zaczerpnięty z teorii lotnictwa, gdy chodziło o ustalenie zależności oporu ruchu ciała w powietrzu od różnych czynników. Według niego pomocną okazała się tu teoria podobieństwa dynamicznego. Według niej ze spostrzeżeń o proporcjonalności oporu względem kwadratu albo pierwszej potęgi prędkości

16 „Sprawozdanie IBTL”, Warszawa 1933, s. 3–8. Uwagi jak poprzednio.

17 Reprint broszury „Kryteria wytrzymałościowe w stereomechanice technicznej” zamieszczono w książce [37].

wyciągnięto wnioski m.in. o koniecznej proporcjonalności również względem gęstości albo lepkości powietrza. Na koniec autor skrytykował zarówno przesadne teoretyzowanie, jak i dążenie do tworzenia formuł obliczeniowych opartych na nieumiejętnej interpretacji wyników doświadczeń.

Podobne wnioski profesor zawarł w artykule opublikowanym po dziesięciu latach w „Przeglądzie...”. Nawiązał tu do swojego wcześniejszego referatu o odkształceniach belek dwuteowych. Chodziło o zjawisko wyboczenia poprzecznego (torsyjnego) belek cienkościennych [10]. Ponieważ wyniki doświadczeń zmierzających do sprawdzenia wzoru Eulera nie dawały spodziewanych wyników, niektórzy badacze stwierdzali niedokładność wzoru i poszukiwali lepszej formuły. Tymczasem nie uwzględniali wpływu nawet niewielkich mimośrodków na zjawisko wyboczenia cienkich ścian. Autor stwierdził, że próby rozwiązania tego zagadnienia to jeden z przykładów wzajemnego oddziaływania teorii i praktyki, przy którym „bądź to postęp teorii wpływa dodatkowo na praktykę, ulepszając konstrukcję i pozwalając na lepsze wyzyskanie bogactw przyrody do celów człowieka, bądź też nowe udane pomysły konstrukcyjne dają impuls do rozwoju teorii, który można zwykle spożytkować i w innych dziedzinach praktyki”.

W nurcie rozważań profesora, które można zaliczyć do refleksji filozoficznej, znajduje miejsce również referat wstępny opublikowany w „Przeglądzie Technicznym” [11] i wygłoszony po objęciu katedry na Politechnice Warszawskiej w 1928 r. Autor skupił się na pozycji mechaniki wśród innych nauk przyrodniczych i technicznych. Według niego jest ona najważniejszą nauką wśród tych, które tworzą pomost między wiedzą czystą a techniką, a zarazem stanowi podłoże rozwoju różnych działów fizyki. Stwierdził, że „bez gruntownej znajomości podstaw i praw mechaniki klasycznej, jakkolwiek niezupełnie ścisłych z punktu widzenia relatywizmu, niepodobna wnikać głębiej i opanować żadnej innej gałęzi fizyki”.

Następnie autor omówił główne fazy i efekty rozwoju poszczególnych działów mechaniki, wspominając ich twórców. W podsumowaniu, stanowiącym swoiste credo dla jego dalszych działań, skrytykował szkodliwy dla praktyki inżynierskiej sztuczny podział nauk czystych i stosowanych, uważając, że w tej kwestii pożądana jest harmonia. „Dążenie do niej w naszych skromnych warunkach przyświecało mojej trzydziestoletniej pracy. Będę szczęśliwym, jeżeli mi się powiedzie na placówce naukowej w stolicy Polski dodać jeszcze parę cegiełek do budowy tej harmonii u nas”.

Kolejna fascynacja Hubera to teoria względności Alberta Einsteina, która wówczas stawiała się coraz bardziej popularna. Na początku lat dwudziestych opublikował pięć artykułów i wygłosił trzy odczyty na ten temat. Obszerny wykład popularyzujący koncepcje Einsteina zawarł w broszurze „Albert Einstein i jego teoria” [9], dostępnej jako reprint w książce [37]¹⁸. Teorię względności nazwał przewrotem w fizyce i postanowił podać i omówić jej zasady w krytycznej

odpowiedzi na pełen niekompetentnych stwierdzeń i opinii (jego zdaniem) felieton, autorstwa tajemniczego pana J. Z., który ukazał się w lwowskiej gazecie codziennej „Słowo Polskie”

Huber stwierdził na wstępie, że trudności w zrozumieniu tej teorii wynikają z „dziedzicznego obciążenia naszych umysłów niefizycznymi pojęciami bezwzględnego czasu, bezwzględnej przestrzeni i wskutek wiary w dogmat o stałości masy”. Dalej wspominał o teorii kwantowej światła Maxa Plancka. Przyczołżył też argumenty doświadczalne przemawiające za słusznością teorii względności, m.in. o oddziaływaniu pola grawitacyjnego na promienie świetlne. Polemizował z poglądami, jakoby zbyt zaawansowany aparat matematyczny był przyczyną niedostępności teorii względności. Zwrócił uwagę na fakt, że przy tworzeniu teorii względności „święciły praktyczny tryumf takie gałęzie tej nauki, które uprawiano dotąd tylko w celach matematycznych (geometria nieeuklidesowa itp.)”. Przyczołżając różne rozważania i podając przykłady względności czasu, stwierdził, że określenie czasu ma ścisłe znaczenie tylko wtedy, gdy znany jest układ odniesienia, w którym ten czas się podaje. Odnośnie do masy zwrócił uwagę na to, że Einstein udowodnił równoważność masy grawitacyjnej i bezwładnościowej.

Profesor odnotował kryzys, a nawet i upadek teorii eteru, którą reprezentowali jeszcze niektórzy fizycy. Zwrócił jednocześnie uwagę na emocjonalne, mające czasem zabarwienie antysemickie, ataki różnych uczonych na Einsteina. Cytując Moritza Schlicka, Huber stwierdził, że realna jest jedynie współzależność przestrzeni, czasu i rzeczy, a rozpatrywanie ich oddzielnie jest tylko abstrakcją. I napisał, że Einstein dowiódł, iż struktura wszechświata jest nieograniczona, ale skończona: „Poza światem nie ma przestrzeni; przestrzeń istnieje tylko, o ile istnieje materja, ponieważ przestrzeń sama w sobie jest wytworem abstrakcji [...]. Trudno o piękniejsze uwieńczenie ogólnej teorii względności jak powyższy obraz budowy wszechświata nacechowany zdumiewającą konsekwencją i zadowalający w zupełności tak przyrodnika, jak i filozofa”.

Tekst Hubera jest trudny do streszczenia, dlatego posłużyliśmy się kilkoma cytatami. Jego narracja i sposób dowodzenia osiągnięć Einsteina charakteryzują się erudycją, styl jest specyficzny, nieco emocjonalny, ale zarazem merytoryczny. Opracowanie liczy prawie trzydzieści stron. Autor sięgnął do cytatów i omówień prac uczonych, którzy zajmowali się dotąd mechaniką. Wskazał na pewne trudności i niekonsekwencje, które cechowały efekty tych prac. Następnie podał odpowiedzi, których w dziedzinie mechaniki dostarcza teoria względności. Na koniec wrócił do podsumowania polemiki z autorem felietonu, ziejącym „jak gdyby zbożnym zachowawczym wstrętem do przedsięwziętej i dokonanej przez Einsteina rewolucji w nauce”.

Okres działalności Hubera to czas kształtowania się polskiej terminologii technicznej. Proces ten był utrudniony przez pozostałości wpływów językowych byłych zaborców i tradycji szkół, z których wywodzili się polscy uczeni. On sam był niezwykle aktywny w tej dziedzinie. Prócz wzmianek terminologicznych w różnych artykułach zamieścił

18 Autorzy tej publikacji podają jeszcze jedną pozycję Hubera: przekład prawie 90-stronicowej książki Einsteina *O szczególnej i ogólnej teorii względności*, wyd. I – Lwów-Warszawa 1921, wyd. II – Lwów-Warszawa 1923.

w prasie technicznej blisko trzydzieści tekstów i notatek na te tematy. Dotyczyły one np. rozróżnienia między własnościami i właściwościami, materiałem i tworzywem, nazw jednostek wielkości fizycznych, pojęć z dziedziny mechaniki i wytrzymałości (np. przez pewien czas próbował zastąpić „wytrzymałość materiałów” określeniem „stereomechanika techniczna”).

Po lekturze wielu tekstów profesora trudno się oprzeć wrażeniu, że w ogóle lubił polemiki. Aby zapoznać się z jego polemicznym stylem, warto przywołać np. list, który Huber skierował do redakcji „Czasopisma Technicznego” [15]. Była to odpowiedź na uwagi krytyczne prof. Adama Kuryłły¹⁹ z poprzedniego numeru (nr 21, s. 349–350), dotyczące odmienności terminów wytrzymałościowych używanych przez niego i przez innych uczonych, szczególnie M.T. Hubera. Kuryłło był zwolennikiem terminu „natężenie” na określenie siły wewnętrznej odniesionej do jednostki pola przekroju. Uważał go za tradycyjny, bardziej utrwalony w literaturze, natomiast „naprężenie” traktował jako rusecyzm, termin gorszy i niepotrzebnie wprowadzany do ówczesnych publikacji technicznych. Za jednego z głównych „winowajców” uważał podręcznik *Kurs wytrzymałości materiałów* Timoszenki, wydany po polsku w tłumaczeniu Hubera w 1921 r.

W spokojnej i rzeczowej odpowiedzi Hubera znajdujemy argument, że „naprężenie” zostało wprowadzone przez redaktorów poradnika *Technik* w 1905 r. i że słowo ma pochodzenie rdzennie polskie. Natomiast określenia „natężenie” używał i on sam, ale w nieco innym znaczeniu – „intensitas”. Stwierdził, iż mimo wytykanej mu znajomości i stosowania języka rosyjskiego, podejmował niejednokrotnie walkę z rusecizmami w tekstach naukowych, podobnie jak robił z germanizmami, i tu zgadzał się z prof. Kuryłłą.

Do tej problematyki wrócił Huber 15 lat później w artykule opublikowanym w „Mechaniku” [19]. Przypomniał, że on sam wiele lat wcześniej zmienił zakres użycia pojęć „natężenie” i „naprężenie”, mimo iż jest przeciwnikiem wprowadzania zmian znaczeń pojęć używanych w nauce. Termin „natężenie” był wcześniej rzeczywiście powszechnie używany, głównie we Lwowie, a wprowadził go Władysław Kluger w swojej znakomitej *Wytrzymałości materiałów* z 1870 r. Niemniej jednak słowo „natężenie” bardziej odpowiada intensywności pewnych zjawisk fizycznych, np. przepływów, pola sił, pola grawitacyjnego czy magnetycznego itp. Dla siły wewnętrznej, odniesionej do jednostki pola przekroju, autor zaczął więc używać określenia „naprężenie” i termin ten coraz bardziej się rozpowszechnia. Według Hubera jest słowem czysto polskim, choć ma etymologię wspólną z odpowiednikiem rosyjskim, jest to jednak normalne dla języków słowiańskich. Natomiast termin „napięcie” oznacza siłę wewnętrzną między dwiema stronami przekroju (w elektrotechnice jest to różnica potencjałów).

¹⁹ Adam Kuryłło był profesorem statyki budowli i budownictwa na Politechnice Lwowskiej. Po 1945 r. pozostał we Lwowie jako jeden z pięciu profesorów Politechniki, którzy nie wyjechali. Zmarł we Lwowie w 1980 r.



Ryc. 6. Tablice na grobowcu Godlewskich na Cmentarzu Rakowickim (źródło: pl.wikipedia.org oraz *Biuletyn PTMTiS* 2017 r.)

Technika Lotnicza zaczęła ukazywać się w 1938 r. Już od samego początku możemy odnotować kontakt prof. Hubera z naszym pismem. Zaczęło się od tego, że w numerze 10 z 1938 r. (s. 309–313) pojawił się artykuł inż. Kazimierza Wolskiego (w okresie powojennym profesora PW) „Materiały niemetalowe w lotnictwie”. Autor wziął pod uwagę drewno, także specjalnie ulepszone, oraz żywice fenolo-formaldehydowe. Jeśli chodzi o obciążenie, to założył pracę analizowanych elementów pod wpływem napięcia wstępnego i niewielkich oscylacji dających obciążenia zmęczeniowe (dla ilustracji podał szkic wykresu Smitha). W pierwszej części artykułu opracował kryteria porównawcze dla materiałów i przeprowadził analizę, z której wynikało, że drewno, zwłaszcza ulepszone żywicami i klejami, jest bardzo dobrym

materiałem do budowy płatowców. W drugiej części podał metodę obliczeń dźwigarów niejednorodnych – o strukturze kompozytowej albo laminatowej. W celu wyznaczenia rozkładu naprężeń w przekroju należało znaleźć położenie warstwy obojętnej i autor podał wspomnianą wyżej metodę. Redakcja zaopatrzyła ten fragment uwagą, że „metoda ta jest stosowana w konstrukcjach żelbetowych”, co poruszyło autora – odczuł ją jako posądzenie o niesamodzielną pracę.

Trzy miesiące później, w numerze 1 z następnego roku, w rubryce „Listy do redakcji” ukazał się interesujący tekst. Był to list Hubera do Wolskiego, opublikowany na prośbę samego Wolskiego. Profesor odniósł się do wyżej omówionego artykułu i do sytuacji po jego publikacji [18]. Opinia Hubera o samym artykule była pozytywna i życzliwa. Natomiast przyczyną napisania listu była informacja o niezadowoleniu Wolskiego z powodu uwagi redakcji. Profesor uznał, że powinien zabrać głos w tym temacie ze względu na ponad 40-letnie doświadczenie w pracy nad konstrukcjami żelbetowymi (nie jest wykluczone, że Huber był recenzentem artykułu Wolskiego). Poza tym przesłał Wolskiemu odbitkę swojej pracy z 1905 r. z podobnym rozwiązaniem. W liście przekonywał do rezygnacji z chowania urazy, pisząc: „na arenie naszych nauk technicznych zdarza się nader często, że idee rozwiązania pewnych zagadnień aktualnych powstają niezależnie od siebie w środowiskach naukowych różnych specjalności technicznych”. Huber sam miał podobną sytuację, gdy jeden ze sławnych uczonych francuskich zwrócił mu uwagę na podobieństwa jego referatu z jego własną, dużo wcześniejszą pracą.

Zakończenie

W artykule wykazaliśmy wkład prof. Hubera do naukowo-technicznych początków polskiego lotnictwa. Jego udział w pionierskich działaniach dotyczył zarówno tworzenia i rozwoju teorii lotu w powietrzu, jak i wytrzymałościowych aspektów konstrukcji statków powietrznych. Postać profesora z pewnością zasługuje na uwagę z racji różnorodności osiągnięć, wszechstronności i umiejętności naukowego podejścia do wielu zagadnień, nawet tych spoza stereo-mechaniki technicznej i kryteriów wytrzymałości materiału. Dlatego dodaliśmy wzmianki o jego zainteresowaniach filozoficznych, językoznawczych oraz dotyczących nowoczesnej fizyki.

Wyjątkową pozycję profesora i jego znaczenie dla polskiej nauki okresu międzywojnia trafnie określili autorzy opracowania [32] w rozdziale *Charakterystyka działalności naukowej*: „Maksymilian Tytus Huber [...] był w kraju – zarówno z racji swego stanowiska, jak i z racji swych pionierskich prac i znakomych osiągnięć – zarazem najwyższym autorytetem w zakresie zagadnień wytrzymałości konstrukcji maszynowych i lotniczych, jak i niezawodnym ekspertem w tej dziedzinie”.

Nasze czasopismo w początkach powojennej działalności uhonorowało okolicznościową notatką jubileusz czterdziestolecia (1908–1948) pracy Maksymiliana Hubera na

stanowisku profesora [30]²⁰. Na łamach „Techniki Lotniczej i Astronautycznej” z tej okazji Związek Polskich Inżynierów i Techników Lotniczych podkreślił jego szczególny wkład w rozwój nauki, stanowiącej teoretyczne oparcie dla budowy samolotów. Stwierdzono, że „gdy obecnie tak rozwinięta wiedza lotnicza była w stadium zaledwie początkowym, Profesor podjął się ciężkiego pionierskiego trudu zarówno w dziedzinie nauczania, jak i zespalań w jedną logiczną całość podstaw wiedzy lotniczej”. Wspomniano również o jego roli w opiece nad Związkiem Awiatycznym i o jego krytycznych wystąpieniach prasowych.

Późniejsza aktywność profesora w obszarze techniki lotniczej skupiła się na analizie wytrzymałościowej tych elementów samolotu, których obciążenia rosły wraz ze wzrostem prędkości lotu. Wspomniano o jego współpracy z Państwowymi Zakładami Lotniczymi i Instytutem Badań Technicznych Lotnictwa oraz o samodzielnych publikacjach. Podkreślono zasługi w kształceniu inżynierów i kadr naukowych. Zwrócono uwagę na wkład Hubera w rozwój Laboratorium Wytrzymałości Materiałów Politechniki Warszawskiej.

Niestety, dokładnie trzy lata później „Technika...” zamieściła nekrolog profesora Hubera, który zmarł w grudniu 1950 r. [31]. Stwierdzono na wstępie, że „Śmierć Jego okryła żałobą cały polski świat techniczny, a szczególnie dotknęła Lotnictwo Polskie, które w Zmarłym straciło swego Wielkiego Uczzonego i Pioniera”. Firmowane również przez Związek Polskich Inżynierów i Techników Lotniczych wspomnienie podkreśla, że „z lotnictwem Profesor był od samego początku swej działalności jak najściślej związany. Porywająca idea przypięcia ludzkości skrzydeł zawsze pasjonowała Go i gdy lotnictwo światowe zaczęło stawiać pierwsze kroki, w szeregach jego pionierów stał Profesor, podejmując ciężki trud zarówno położenia podstaw wiedzy lotniczej, jak i rozszerzania jej”.

Bibliografia:

- [1] Huber, M.T. (1910). W sprawie artykułu „Ocena wartości praktycznej latawca”. *Przegląd Techniczny*, 48(7), s. 87–88.
- [2] Schnuetzer, J. (1910). *Teoria i konstrukcja aeroplanów przedmową Dr. M.T. Hubera, Profesora Szkoły politechnicznej*. Księgarnia L. Chmielewskiego, Lwów.
- [3] Huber, M.T. (1912). Rzut oka na obecny stan i najbliższą przyszłość lotnictwa. *Lotnik i Automobilista*, 2(2), s. 1–3.

²⁰ Wspomniemy tu o innym znaczącym sposobie uczczenia osiągnięć profesora przez uczniów i kolegów. Kilka tygodni przed śmiercią wręczono mu *Księgę Jubileuszową dla uczczenia zasług naukowych Prof. dr inż. M.T. Hubera z okazji 50-lecia pracy naukowej*, dzieło 472-stronicowe, zawierające artykuły o różnorodnej tematyce, napisane przez wielu związanych z nim autorów. Historia tego przedsięwzięcia jest skomplikowana – decyzję o realizacji opracowania podjęto w 1938 r. dla uczczenia 40-lecia pracy, ale przeszkodziła w tym wojna. Złożone prace przechował we Lwowie prof. W. Burzyński. Gdy zbliżało się 50-lecie, nowo powstały komitet zebrał je, uzupełnił nowymi artykułami i wydał w ostatecznym kształcie (por. [37]).

- [4] Huber, M.T. (1912). Rola teorii w umiejętnościach technicznych. *Czasopismo Techniczne*, 30(30), s. 385–387.
- [5] Huber, M.T. (1913). Ze statyki ustrojów ramowych. *Przegląd Techniczny*, 51(12, 13, 17, 21, 24).
- [6] Huber, M.T. (1914). O wytrzymałości płyty prostokątnej podpartej wzdłuż całego obwodu. *Przegląd Techniczny*, 52(16, 20, 22, 25).
- [7] Huber, M.T. (1914). Ogólna teoria płyt żel.-betonowych i jej praktyczne zastosowanie do płyty prostokątnej podpartej wzdłuż całego obwodu. Lwów.
- [8] Huber, M.T. (1919, 1920). Teoria płyt prostokątnie-różnokierunkowych, a w szczególności żelazno-betonowych, wraz z zastosowaniami do różnych technicznych zagadnień płyt prostokątnych. *Przegląd Techniczny*, 57(33–48), 58(15, 16, 17, 19, 22, 23).
- [9] Huber, M.T. (1920). Albert Einstein i jego teoria. Spółka Wydawnicza Słowa Polskiego, Lwów.
- [10] Huber, M.T. (1922). Teoria a praktyka w naukach technicznych. *Przegląd Techniczny*, 60(48), s. 367–369.
- [11] Huber, M.T. (1928). O znaczeniu mechaniki i jej nauczaniu. *Przegląd Techniczny*, 66(18), s. 371–381.
- [12] Huber, M.T. (1930). O pewnym przypadku zgięcia belki podłużnie ściskanej, ważnym w statyce lotniczej. *Przegląd Techniczny*, 69(3), s. 45–54.
- [13] Huber, M.T. (1930). O wytrzymałości podłużnic w skrzydłach wspornikowych jednopłatów. *Przegląd Techniczny*, 69(10), s. 221–226.
- [14] Huber, M.T. (1930). Dulęba, L.M. (red.), *Statyka Lotnicza według wykładów na Politechnice Warszawskiej*, Komisja Wydawnicza Tow. Bratniej Pomocy Studentów PW, Warszawa.
- [15] Huber, M.T. (1931). Natężenie czy naprężenie. *Czasopismo Techniczne*, 49(22), s. 375.
- [16] Huber, M.T. (1933). Rola sztywności skrętnej prętów w dźwigarach kratowych lekkich. *Przegląd Techniczny*, 72(24), s. 612–614.
- [17] Huber, M.T. (1934). Rozważania nad zagadnieniem wytrzymałościowym prętów podłużnie ściskanych. *Przegląd Techniczny*, 73(12), s. 403–408, 73(13), s. 432–437.
- [18] Huber, M.T. (1939). Listy do redakcji. *Technika Lotnicza*, 2(1), s. 34.
- [19] Huber, M.T. (1946). Natężenie, naprężenie i napięcie. *Mechanik*, 19(4), s. 142.
- [20] Huber, M.T. (1948). *Kryteria wytrzymałościowe w stereomechanice technicznej*. Instytut Wydawniczy SIMP, Warszawa, s. 16 i 18.

Opracowania ułożone w porządku chronologicznym:

- [21] Z towarzystw technicznych. Towarzystwo Politechniczne we Lwowie. (1910). [b.a.]. *Przegląd Techniczny*, 48(2), s. 20–21.
- [22] Rozmaitości. (1910). [b.a.]. *Czasopismo Techniczne*, 28(4), s. 47.
- [23] Kronika bieżąca. (1911). [b.a.]. *Przegląd Techniczny*, 49(2), s. 22.
- [24] Michalewski, J.K. (1913). Wystawa lotnicza modeli we Lwowie. *Lotnik i Automobilista*, 3(4), s. 8–9.
- [25] Słowo od Redakcji. (1913). [b.a.]. *Lotnik i Automobilista*, 3(5), s. 1–2.
- [26] m. (1914). Z sekcji prasowej Związku Awiatycznego Słuchaczów Politechniki we Lwowie. Inauguracja „Związku Awiatycznego”. *Lotnik i Automobilista*, 4(1), s. nienum.
- [27] Kucharzewski, F. (1914). Piśmiennictwo techniczne polskie. III. Mechanika. *Przegląd Techniczny*, 52(26), s. 345–346.
- [28] Matakiewicz, M. (red.). (1927). *Polskie Towarzystwo Politechniczne we Lwowie (1877–1927). Księga Pamiątkowa*. Lwów, s. 36.
- [29] *Politechnika Lwowska. Jej stan obecny i potrzeby* (1932). [b.a.]. Wydano staraniem grona profesorów, Lwów.
- [30] Huber, M.T. (1948). [b.a.], *Technika Lotnicza*, 3(1), s. 5–6.
- [31] Z żałobnej karty. (1951). [b.a.]. *Technika Lotnicza*, 6(1), s. 27.
- [32] Huber, M.T. (1964). Pisma. Tom I (Życiorys. Sylwetka uczonego na tle epoki. Charakterystyka działalności naukowej. Prace różne. Bibliografia prac.). PWN Warszawa.
- [33] Jungowski, E. (1967). O pionierach polskiej myśli lotniczej. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, s. 211, 221, 234.
- [34] Jost, H. (1977). O profesorze Maksymilianie Tytusie Huberze – inaczej niż zwykle. *Kwartalnik Historii Nauki i Techniki*, 22(2), s. 367–370.
- [35] Sikorski, Z. (1994). Lotniczy Lwów, *Semper Fidelis*. Pismo Towarzystwa Miłośników Lwowa i Kresów Południowo-Wschodnich, Wrocław, nr 2.
- [36] Filip, G. (2000). Loty nad Kulparkowem, forumakademickie.pl.
- [37] Olesiak, Z., Engel, Z. (2006). *Maksymilian Tytus Huber. Biografia i reprinty dzieł naukowych*. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, Radom.
- [38] Pylak, K. (2023). Lwowskie początki polskiej techniki lotniczej. *Technika Lotnicza i Astronautyczna*. Lublin, nr 2, s. 48–61.