

## ZNACZENIE ŁUSEK SKRZYDEŁ LEPIDOPTERA W MECHANICE PŁYNÓW

ZUZANNA KUNICKA-KOWALSKA

*Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy*

*e-mail: zkunicka@ukw.edu.pl*

Artykuł dotyczy badania łusek pokrywających skrzydła owadów z rzędu Lepidoptera (motyle i ćmy) i ich wpływu na mechanikę płynów. W badaniach przeanalizowano dziesięć gatunków motyli, badając geometrię łusek oraz ich wpływ na przepływ powietrza wokół skrzydeł. Głównym odkryciem jest to, że łuski zmniejszają opór aerodynamiczny i ciśnienie na skrzydłach, co zwiększa stabilność przepływu powietrza. Łuski tworzą wiry, które pomagają w rozpraszaniu energii, chroniąc delikatną strukturę skrzydeł przed nadmiernymi siłami. Badania wykazały, że dzięki łuskom liczba Reynoldsa, opisująca rodzaj przepływu (laminarny lub turbulentny), jest znacznie mniejsza, co prowadzi do bardziej stabilnego przepływu. Artykuł sugeruje potencjalne zastosowania technologiczne tego zjawiska, np. w obniżeniu zużycia energii czy redukcji hałasu w lotnictwie.

Łuski pokrywające skrzydła owadów z rzędu Lepidoptera badane były wielokrotnie przez naukowców z różnych dziedzin, najczęściej o specjalizacji biologicznej. W pierwszej kolejności podejmowano próbę określenia na podstawie rodzaju, koloru i kształtu łusek przynależność gatunkową danego osobnika. Ich budowa i struktura może stanowić cechę gatunkową i być pomocna przy klasyfikacji osobników [8, 11]. Analizie podlegała także ewolucja pokrycia łuskami u ciem i motyli na przestrzeni epok fanerozoiku, przy czym zaprezentowano ogólną zmianę kształtu i zmniejszenie długości [10]. Właściwości kolorystyczne, termoregulacyjne, a także dokładniejsze aspekty budowy prezentuje monografia [1].

Opisano także badania [2, 12] pod kątem optycznych właściwości powierzchni pokrytych łuskami. Autorzy zajmowali się odbiciem fal świetlnych. Pokrycie skrzydeł łuskami rozpatrywane jest jako materiał o strukturze nanofotonicznej, gdzie rozproszenie dotyczy częstotliwości. Bioniczne podejście jest pod kątem zastosowań technicznych z zakresu optyki. Owady o łuskach z takimi właściwościami analizowane są także w niniejszej pracy (np. mieniak strużnik), jednak opisywany efekt dotyczy zupełnie innej skali struktury samych łusek. Matthias Saba i inni [9] ujawniają brak polaryzacji kołowej odbicia optycznego. W artykule [11] opisano nawet próbę odtworzenia powierzchni porytej łuskami, która będzie naśladować właściwości optyczne oryginału.

Krisztián Kertész, Gábor Piszter, Emma Jakab, Zsolt Bálint, Zofia Vértesy, László Péter Biró [5] także skupiają się na właściwościach optycznych łusek, ale wykazują również, że struktura łusek penetrowana jest przez parę wodną. Wpływ wilgotności środowiska poprzez penetrację struktury skrzydeł przez parę wodną ma znaczący wpływ na zmianę ich właściwości mechanicznych, co wykazano w artykule [7]. Rozważania zależności struktury skrzydeł od warunków środowiskowych potwierdza artykuł [10], gdzie omawiany jest rozwój ewolucyjny Lepidoptera, co w kontekście zmian właściwości fizycznych atmosfery rzuca nowe światło na odmienną od biologicznej funkcję pokrycia łuskami.

Natomiast w artykule [4] wykazano eksperymentalnie na podstawie uproszczonego modelu, że pokrycie skrzydeł łuskami zwiększa siłę nośną, a jednocześnie zmniejsza współczynniki tłumienia. Autor na podstawie badań własnych i literaturowych wśród funkcjonalnych korzyści

pokrycia skrzydeł łuskami wymienia także: zmniejszenie wibracji, zmniejszenie emisji mocy akustycznej, absorpcję ultradźwięków nietoperzy (brak odbicia – funkcja biologiczna), zwiększenie manewrowości oraz uzyskanie wspomnianych efektów optycznych i kolorystycznych.

Wpływ pokrycia powierzchni łuskami na opływ wykazano także podczas badań rekinów Mako, co wraz z obliczeniami zaprezentowano w artykule [3]. Omawiany przypadek dotyczy jednak opływu w środowisku wodnym, a więc nieściśliwym i lepkiem, gdzie struktura i mechanika łusek jest odmienna.

W niniejszej pracy poddano analizie łuski dziesięciu gatunków rzędu Lepidoptera, aby pozyskać syntetyczne dane geometryczne ukształtowania powierzchni nośnych i poddać je analizie numerycznej. Obliczenia numeryczne uśrednionej powierzchni pokrytej łuskami mają uwidocznić zachodzące zjawiska w obrębie łusek w sensie jakościowym.

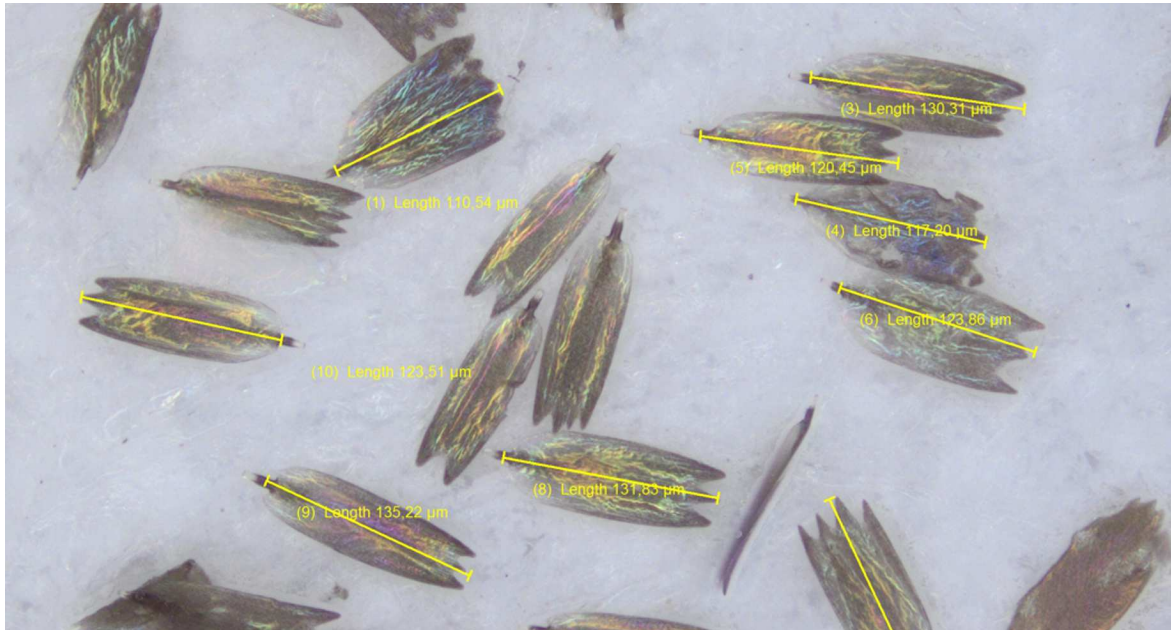
Do analizy wykorzystano owady z hodowli. Wybrane motyle naturalnie występują w różnych miejscach na świecie. Badane gatunki oznaczono symbolami (tabela 1).

**Tabela 1.** Badane gatunki – miejsca występowania i oznaczenia

Lp.	Gatunek	Występowanie	Oznaczenie do analizy
1	Catonephele numilia	Meksyk, Argentyna	CN
2	Hamadryas iphthime	Meksyk, Ameryka Środkowa, północna część Ameryki Południowej	HI
3	Graphium agamemnon	Nepal, Indie, Sri Lanka, Południowa Azja, Australia	GA
4	Lycorea halia	Peru, Karaiby, Meksyk	LH
5	Danaus chrysippus	Afryka, Azja, niektóre wyspy Pacyfiku, Australia	DC
6	Papilio protenor	Południowa i wschodnia Azja	PP
7	Papilio machaon	Europa, Azja, północna Afryka	PK
8	Nymphalis antiopa	Europa, Ameryka Północna	RZ
9	Aglais io	Azja, Europa	RP
10	Apatura ilia	Azja, Europa	MS



Rys. 1. Przykładowe pomiary kątów nachylenia łusek

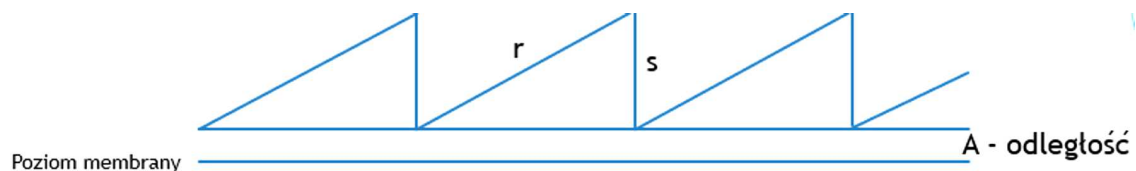


Rys. 2. Przykładowe pomiary długości wolnych łusek

Dla każdego z wymienionych gatunków zostały wykonane próbki skrzydeł i samych łusek, którym wykonano fotografie mikroskopowe za pomocą mikroskopu świetlnego Olympus BX52. Na podstawie dokumentacji zdjęciowej dokonano pomiarów najważniejszych wielkości, takich jak długość, szerokość, kąt nachylenia łuski i ich wzajemne położenie. Na rysunku 1 przedstawiono przykładowe pomiary kątów na jednej z próbek, natomiast na rysunku 2 widać pomiary długości wolnych łusek.

Całościowe pomiary zostały zebrane w postaci wykresów, następnie uśrednione oraz uśrednione z pominięciem pomiarów o znacznym odchyleniu. Do kolejnych obliczeń przyjęto wyniki zaokrąglone (tabela 2).

Na podstawie wykonanych pomiarów opracowano wzór ukształtowania powierzchni pokrytej łuskami. Schemat ten (rys. 3) obejmuje wymiary:  $r$  – długość łuski nie pokryta przez poprzednią łuskę,  $s$  – skok wysokości pomiędzy krawędzią jednej łuski a powierzchnią następną,  $A$  – odległość linii łączącej najniższe położone punkty nie pokryte przez poprzednią łuskę a membranę skrzydła.



Rys. 3. Schemat ukształtowania powierzchni pokrytej łuskami

Dla każdego badanego gatunku wykonano obliczenia wspomnianych wielkości i uzyskano analogiczne wykresy jak pokazane w tabeli 2. Przedstawiono je w tabeli 3.

Na podstawie pozyskanych danych wykonano trójwymiarową geometrię do obliczeń przepływowych, zakładając nachylenie ścianki ukształtowanej na wzór pokrycia łuskami pod kątem  $10^\circ$  w celu wymuszenia intensywniejszej reakcji płynu. Jest to zgodne z obserwacjami u motyli, gdzie powierzchnie nośne zawsze przyjmują nacisk pod kątem ostrym [6].

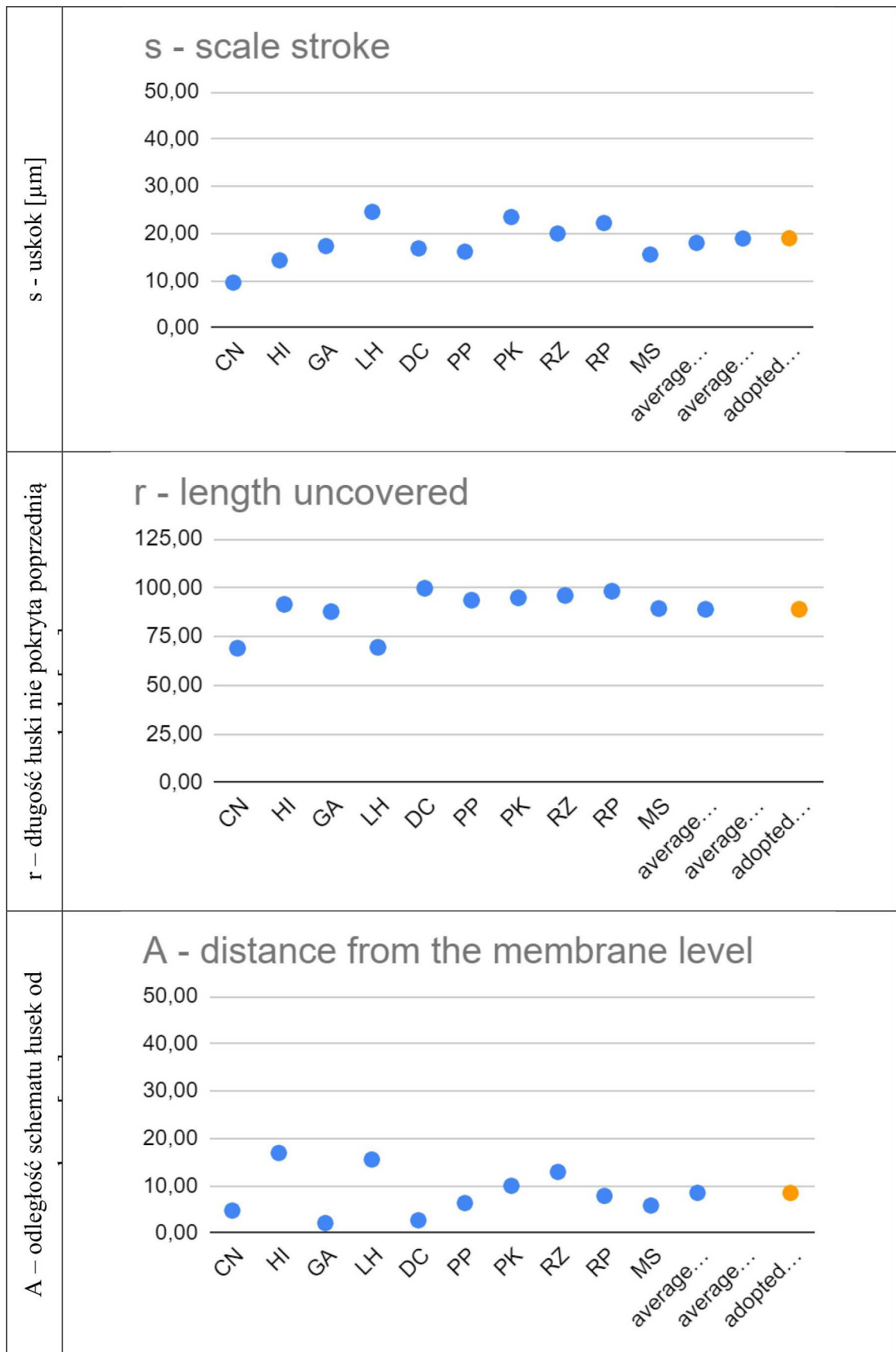
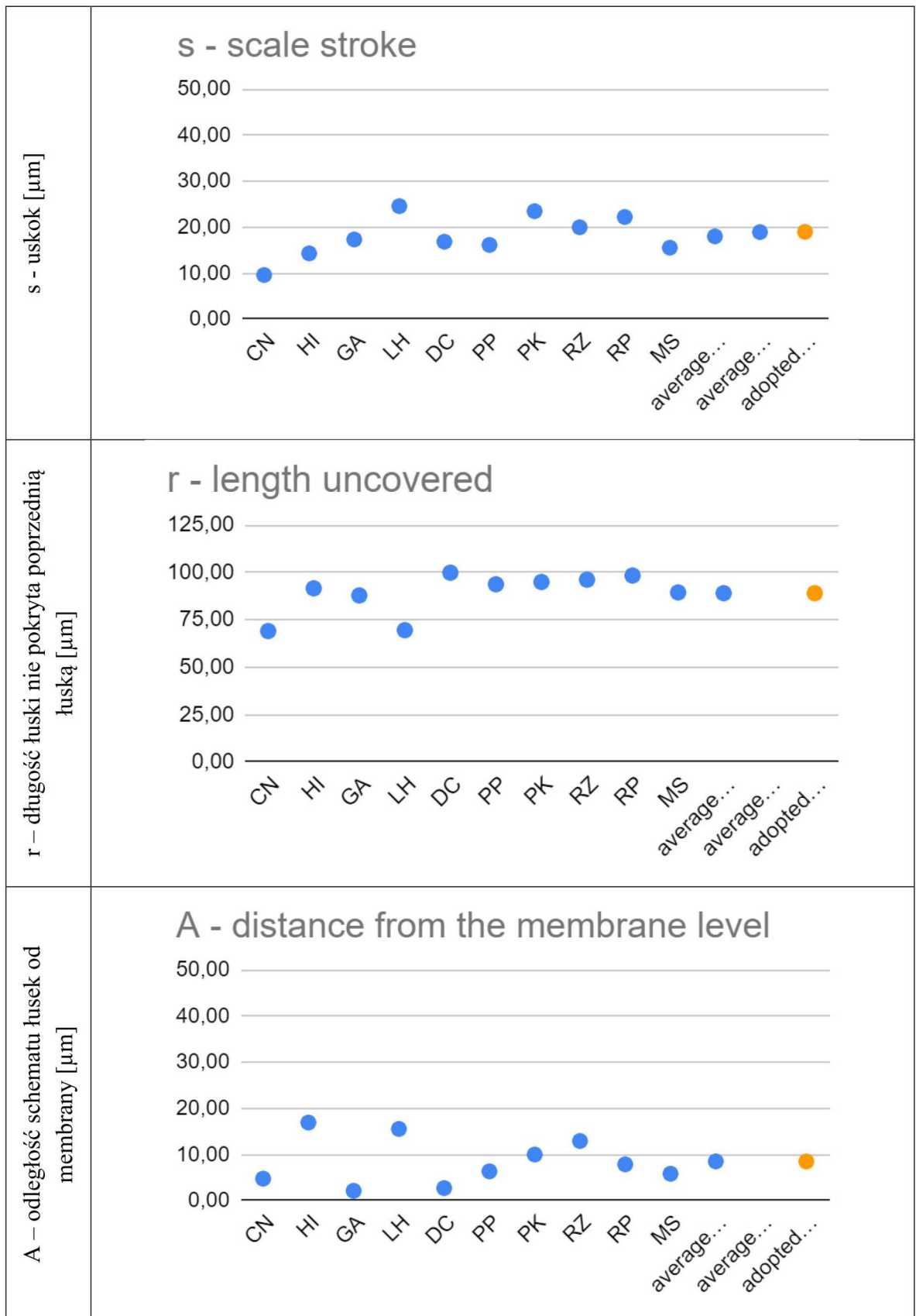
**Tabela 2.** Uzyskane wyniki pomiarów wielkości geometrycznych w mikrometrach

Tabela 3. Obliczone wielkości opisujące ukształtowanie powierzchni pokrytej łuskami



Ponieważ w przypadku obliczeń przepływowych rozważa się turbulencję przepływu lub jej brak, podając liczbę Reynoldsa, podjęto próbę jej wyliczenia. Wzór na liczbę Reynoldsa

$$Re = \frac{ul}{\nu}$$

gdzie:  $u$  jest prędkością charakterystyczną płynu, czyli w omawianym przypadku powietrza, którą u motyli określono jako 0,5 m/s [6] (jest to prędkość rzeczywista przy skrzydle, a nie prędkość lotu poziomego),  $\nu$  – lepkość kinematyczna płynu [m<sup>2</sup>/s],  $l$  – wymiar charakterystyczny zagadnienia [m].

Co do zasady jako wymiar charakterystyczny zagadnienia rozumie się wymiar geometryczny, który ma bezpośrednie znaczenie dla stabilności przepływu. A zatem w przepływie w rurze będzie to jej średnica, nie długość, która nie wpływa bezpośrednio na zaburzenie stateczności płynu. Tu powstaje zasadnicze pytanie, jaki wymiar należy traktować jako referencyjny w przypadku opływu skrzydła pokrytego łuskami. Czy nie należałoby analogicznie do przypadku rury założyć, że długość skrzydła odpowiada długości rury? Nie ma zatem bezpośredniego wpływu na stateczność, a uznać natomiast, że elementem istotnie wpływającym na stateczność przepływu jest sama łuska i to jej wymiar należy traktować jako referencyjny. Tak rozumując, należy uznać, że w przypadku opływu skrzydła z łuskami wymiar charakterystyczny, a więc wpływający na stateczność płynu to długość łuski. Natomiast w przypadku opływu skrzydła gładkiego, nie pokrytego łuskami, jako wymiar charakterystyczny należy podać długość samego skrzydła. Można więc uznać, że w sensie teoretycznym, liczba Reynoldsa jest wielokrotnie (zależności od gatunku owada od kilkuset do nawet tysiąca razy) mniejsza w przypadku skrzydła pokrytego łuskami. Oznacza to, że stabilność przepływu byłaby tak samo wielokrotnie większa. Ponieważ jednak liczba Reynoldsa jest uproszczeniem matematycznym, które ma ułatwiać porównywanie przepływów, trudno jednoznacznie orzec, jak należałoby ją policzyć prawidłowo, ponieważ nie uwzględnia ona tak złożonych struktur. Nie mniej jednak, czysto matematycznie można określić opływ skrzydła pokrytego łuską za daleko bardziej stabilny niż opływ skrzydła gładkiego. W zależności od gatunku motyla i związanej z nim długości skrzydła liczba Reynoldsa może być na granicy przepływu turbulentnego, jeśli do obliczeń przyjmie się rzeczywistą prędkość płynu, a nie prędkość lotu poziomego (patrz tabela 4). Na potrzeby obliczeń i ich porównania potraktowano przypadek jako laminarny.

**Tabela 4.** Obliczenia liczby Reynoldsa

Prędkość powietrza przy skrzydle	0,5 m/s
Lepkość kinematyczna powietrza	0,00001461 m <sup>2</sup> /s
Orientacyjna długość skrzydła motyla	7 cm = 0,07 m
Średnia długość łuski	125 μm = 0,000125 m
Liczba Reynoldsa dla skrzydła gładkiego	2395,62
Liczba Reynoldsa dla skrzydła pokrytego łuskami	4,28
Stosunek liczb Reynoldsa w obu przypadkach	560

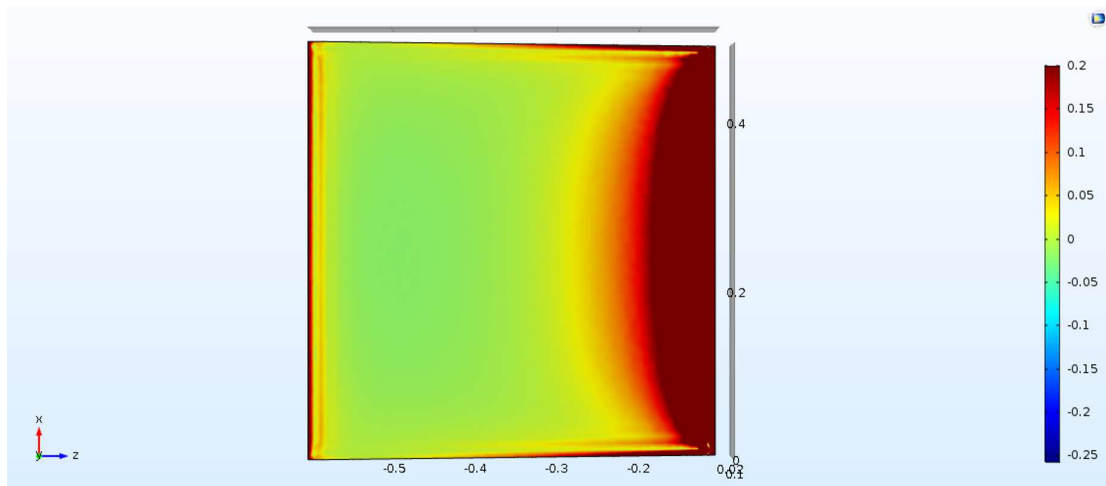
Obliczenia numeryczne przy tych samych prędkościach wykonano w programie Comsol Multiphysics. Zastosowano siatkę typu tetra o liczbie elementów:

- dla przypadku z gładką powierzchnią: 219778,
- dla przypadku z powierzchnią z łuskami: 809978.

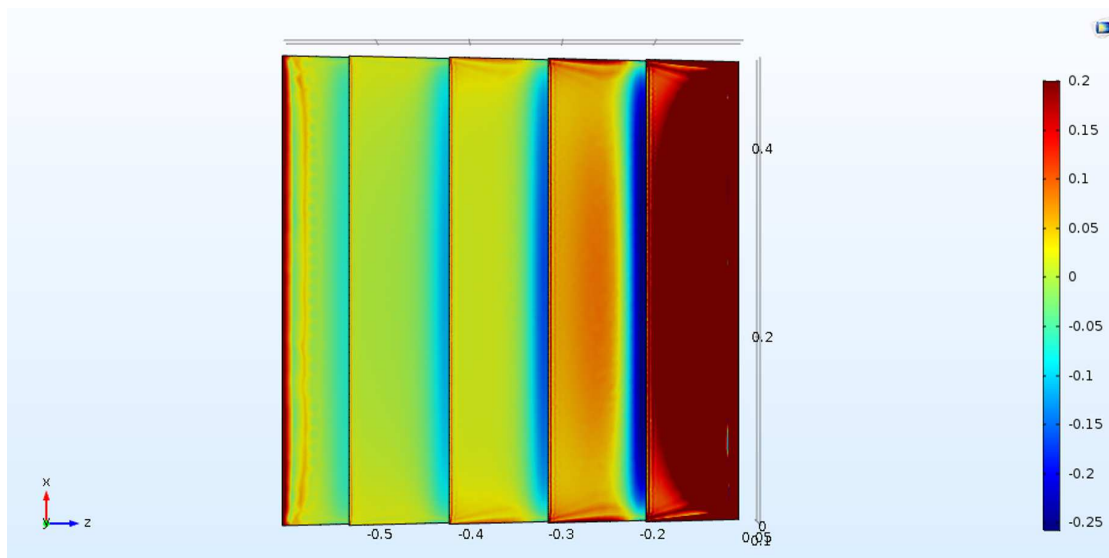
W obu przypadkach oczka siatki były dogęszczone przy opływanej powierzchni, a średnie tempo wzrostu oczka siatki wynosiło:

- dla przypadku z gładką powierzchnią: 1,684,
- dla przypadku z powierzchnią z łuskami: 1,736.

Ciśnienie działające na powierzchnię opływającą pokazano na rysunkach 4 i 5. Wyraźnie widać różnicę kolorystyczną przy tej samej skali barwnej. Podczas sumowania po węzłach można wyznaczyć ciśnienie działające na powierzchnię około 0,0867 Pa w przypadku powierzchni z łuskami oraz około 0,403 Pa w przypadku powierzchni gładkiej. Pokrycie łuskami zmniejsza ciśnienie na tę samą powierzchnię o około 80%. Zmniejszenie ciśnienia oddziaływującego na powierzchnię zmniejsza jednocześnie tarcie.



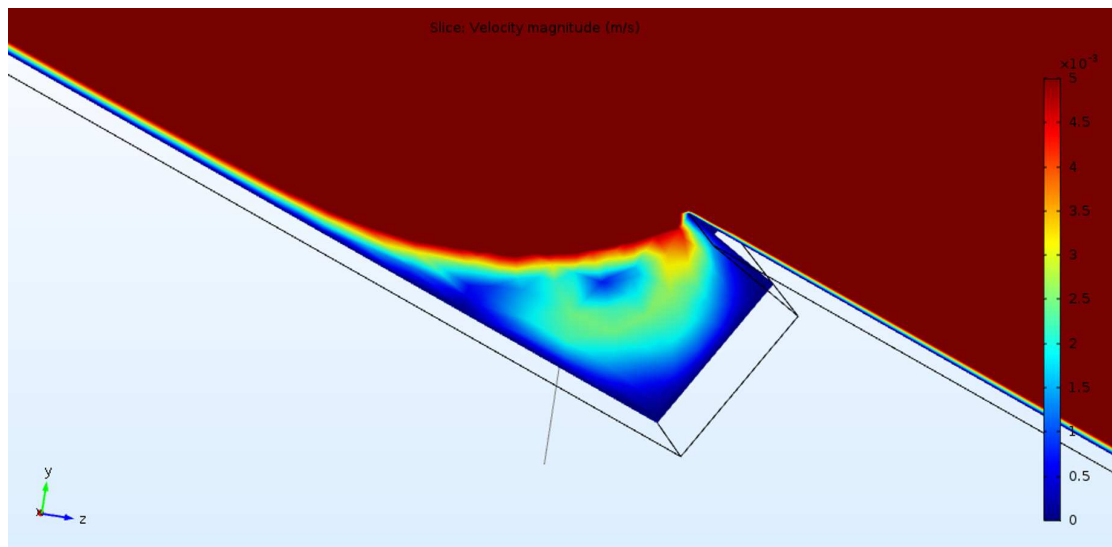
Rys. 4. Rozkład ciśnienia na opływanej powierzchni gładkiej [Pa]



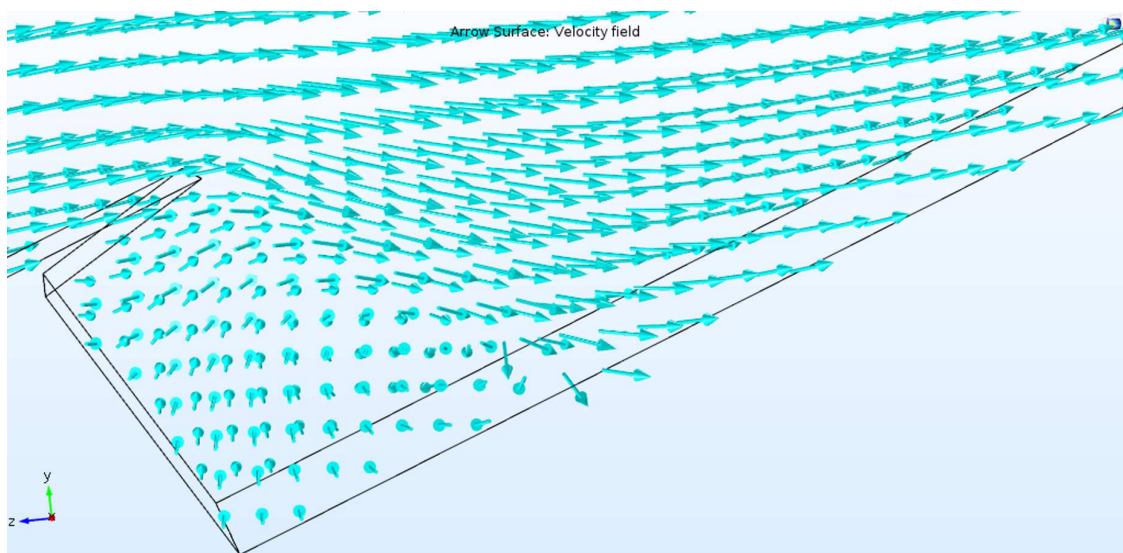
Rys. 5. Rozkład ciśnienia na opływanej powierzchni pokrytej łuskami [Pa]

Przyczynę tego efektu widać wyraźnie, ilustrując rozkład prędkości między łuskami (rys. 6) oraz położenie i orientację wektorów prędkości (rys. 7). Można zauważyć, że powietrze, uderzając w powierzchnię pojedynczej łuski rozdziela się na dwa strumienie, przy czym jeden z nich tworzy wir pod strukturą łuski, a następnie łączy się z głównym przepływem, dodając swoją energię do opływu. W stanie ustalonym powoduje to całościowe zmniejszenie nacisku na powierzchnię. Dodatkowo można także wnioskować, że mechanizm ten chroni delikatną strukturę skrzydła przed działaniem nadmiernych sił.

Co więcej, mechanizm ten ma właściwość samoregulacji: im większy jest wir pod łuską, tym mniejsze uderzenie w następną łuskę, co w konsekwencji osłabia wir i prowadzi do zwiększonej energii rozłączającej strumień, która z kolei oznacza większą energię wiru.



Rys. 6. Rozkład prędkości między łuskami [m/s]



Rys. 7. Położenie i orientacja wektorów prędkości między łuskami

Kolejnym etapem prac powinna być analiza możliwości technologicznego wykorzystania zjawiska i obliczenie wymiernych korzyści, jakie przyniosłoby takie zastosowanie w zakresie:

- obniżenia zużycia energii,
- obniżenia emisji mocy akustycznej.

### Bibliografia

1. BERTHIER S., *Iridescences. The Physical Colors of Insects*, Springer, Paris, 2007
2. ZHONG B., GUO W.-L., HE D.-Y., XING Z.-G., HUANG Y.-F., LV X.-R., Anti-reflective properties of butterfly-wing-micro-nano structures in the infrared band, *Optics and Laser Technology*, **169**, 2024
3. DIEZ G., SOTO M., ILZARBE J., Biological characterization of the skin of shortfin mako shark *Isurus oxyrinchus* and preliminary study of the hydrodynamic behaviour through computational fluid dynamics, *Journal of Fish Biology*, 2015



4. KOVALEV I., The functional role of the hollow region of the butterfly pyrameis atalanta (L.) Scale, *Journal of Bionic Engineering*, **5**, 3, 224-230, 2008
5. KERTÉSZ K., PISZTER G., JAKAB E., BÁLINT Z., VÉRTESEY Z., BIRÓ L.P., Color change of Blue butterfly wing scales in an air – Vapor ambient, *Applied Surface Science*, **281**, 49-53, 2013
6. KUNICKA-KOWALSKA Z., LANDOWSKI M., SIBILSKI K., Deformable model of a butterfly in motion on the example of *Attacus atlas*, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, **133**, 2022, ISSN 1751-6161
7. LANDOWSKI M., KUNICKA-KOWALSKA Z., SIBILSKI K., Mechanical and structural investigations of wings of selected insect species, *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, **22**, 2, 199-209, 2020, DOI: 10.37190/ABB-01525-2019-03
8. LI M., ZHOU G., CAI W., LI J., LI M., HE M., HU Y., LI L., Multi-scale Sparse Network with Cross-Attention Mechanism for image-based butterflies fine-grained classification, *Applied Soft Computing*, **117**, 2022
9. SABA M., WILTS B.D., HIELSCHER J., SCHRDER-TURK G.E., Absence of circular polarisation in reflections of butterfly wing scales with chiral gyroid structure, *Materials Today: Proceedings*, **1**, Supplement, 193-208, 2014
10. WANG J., ZHANG W.-T., ENGEL M.S., SHENG X., SHIN C., DONG R., Early evolution of wing scales prior to the rise of moth and butterflies, *Current Biology*, **32**, 17, 2022
11. HAN Z., LI B., MU Z., YANG M., NIU S., ZHANG J., REN L., Fabrication of the replica templated from butterfly wing scales with complex light trapping structures, *Applied Surface Science*, **355**, 290-297, 2015
12. JAKŠIĆ Z., PANTELIĆ D., SARAJLIĆ M., SAVIĆ-ŠEVIĆ S., MATOVIĆ J., JELENKOVIĆ B., VASILJEVIĆ-RADOVIĆ D., ČURČIĆ S., VUKOVIĆ S., PAVLOVIĆ V., BUHA J., LAČKOVIĆ V., LABUDOVIĆ-BOROVIĆ M., ČURČIĆ B., Butterfly scales as bionic templates for complex ordered nanophotonic materials: A pathway to biomimetic plasmonics, *Optical Materials*, **35**, 10, 1869-1875, 2013

### The significance of Lepidoptera wing scales in fluid mechanics

The article focuses on the study of scales covering the wings of insects from the order Lepidoptera (butterflies and moths) and their impact on fluid mechanics. The research analyzed ten species of butterflies, examining the geometry of the scales and their effect on the airflow around the wings. The main finding is that the scales reduce aerodynamic drag and pressure on the wings, which increases stability of the airflow. The scales create vortices that help in energy dissipation, protecting the delicate structure of the wings from excessive forces. The study showed that, thanks to the scales, the Reynolds number which describes the type of flow (laminar or turbulent) is significantly lower, leading to a more stable flow. The article suggests potential technological applications of this phenomenon, such as reducing energy consumption or noise reduction in aviation.