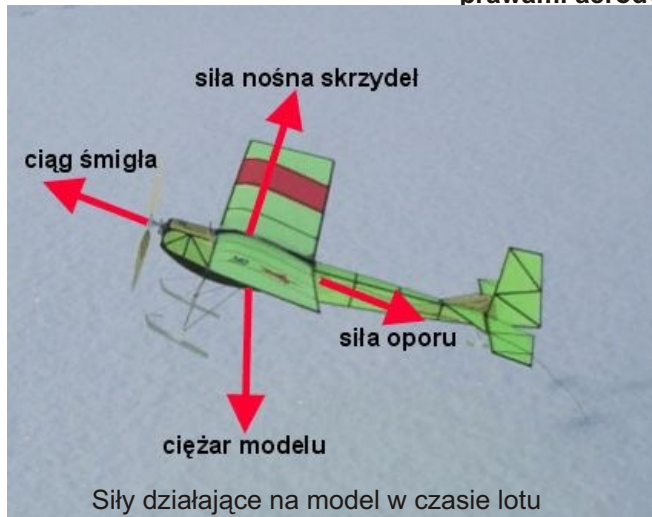
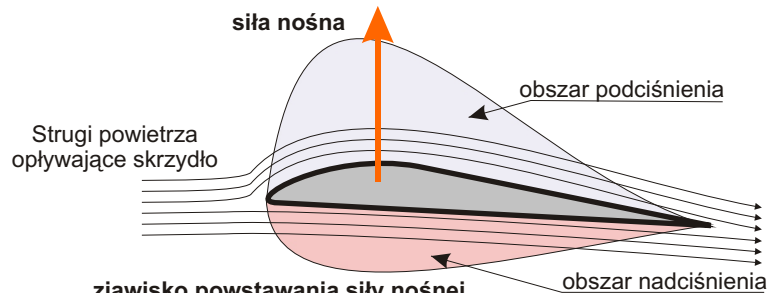


PODSTAWY AERODYNAMIKI

Aby lepiej zrozumieć jakie siły i zjawiska działają na model w czasie lotu musimy zapoznać się z podstawowymi prawami aerodynamiki i mechaniki lotu.



Na każdy model poruszający się w powietrzu działają pewne siły fizyczne, które decydują o jego zdolności do lotu, aby model latał poprawnie (statecznie) muszą się wzajemnie równoważyć.



zjawisko powstawania siły nośnej

SIŁA NOŚNA - pojawia się w wyniku powstania różnicy ciśnień nad i pod skrzydłem poruszającym się w powietrzu, nad skrzydłem powstaje podciśnienie (mniejsze ciśnienie), natomiast pod skrzydłem nadciśnienie (większe ciśnienie). Siła nośna skrzydła pozwala na utrzymanie się modelu w powietrzu.

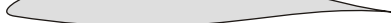
Wielkość siły nośnej zależy od następujących czynników:

Prędkość lotu - siła nośna rośnie do kwadratu prędkości z jaką porusza się model, oznacza to że jeśli model będzie się poruszał dwa razy szybciej, to na skrzydłach powstanie cztery razy większa siła nośna.

Powierzchnia nośna - powierzchnia skrzydeł, od jej wielkości zależy prędkość modelu. Modele o dużej powierzchni nośnej mogą latać powoli, natomiast modele o małej powierzchni aby uzyskać odpowiednią wartość siły nośnej muszą poruszać się z większą prędkością. stosunek ciężaru modelu do powierzchni skrzydła nazywa się obciążeniem powierzchni i decyduje o minimalnej prędkości modelu.

Profil skrzydła - Jest to przekrój poprzeczny skrzydła, od jego kształtu oraz od jakości powierzchni skrzydła zależy w dużej mierze wielkość siły nośnej. Profile skrzydeł są opracowywane w instytutach aerodynamiki. W zależności od tego z jaką prędkością ma się poruszać model lub samolot stosowane są różne profile skrzydeł, od płaskiej płytki, stosowanej w najprostszych modelach latających i latawcach, do wyrafinowanych profili laminarnych, stosowanych w nowoczesnych samolotach.



-  **Płaska płytka** - profil stosowany w usterzeniach modeli.
-  **Wygięta płytka** - profil stosowany w skrzydłach najprostszych modeli latających, poruszających się w zakresie bardzo małych prędkości lotu.
-  **Profil "ptasi"** - stosowany w modelach swobodnie latających w zakresie małych prędkości, dawniej używany był w pionierskich konstrukcjach lotniczych.
-  **Profil płasko wypukły** - powszechnie stosowany zarówno w modelach latających jak i w prostych konstrukcjach lotniczych poruszających się w zakresie małych i średnich prędkości. Ze względu na prostą konstrukcję skrzydła często stosowany w modelach szkolno treningowych.
-  **Współczesny profil "laminarny"** - obecnie stosowany zarówno w lotnictwie jak i w wyczynowych modelach szybowców i samolotów zdalnie sterowanych
-  **Laminarny profil do dużych prędkości** - stosowany w samolotach poruszających się w zakresie prędkości ponad dźwiękowych

SIŁA OPORU- to siła, która hamuje ruch modelu. Im mniejszy jest opór modelu tym lepsze są jego właściwości lotne.

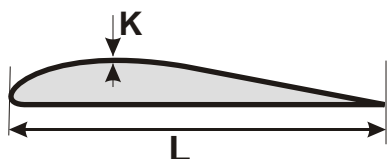
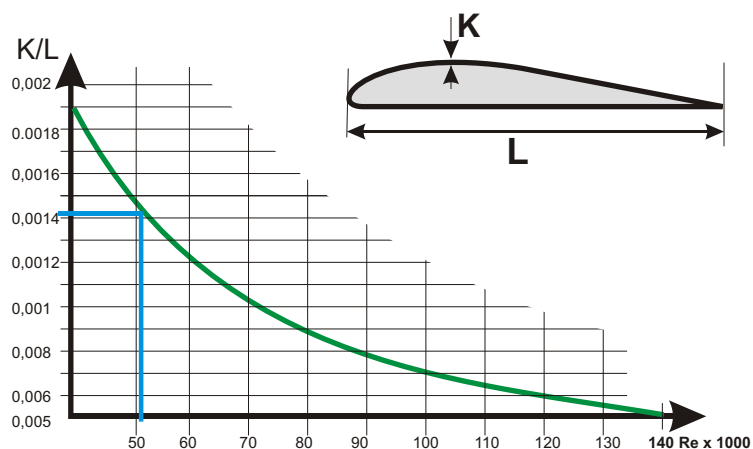
Opór modelu zależy od następujących czynników:

Kształt modelu- im bardziej opływowy (aerodynamiczny) kształt modelu tym mniejszy jest jego opór i lepsze właściwości lotne. Wszelkie wystające części modelu (podwozie, osłona silnika, zastrzały itp.) Powodują wzrost oporu modelu a przez to znaczące pogorszenie jego właściwości lotnych. Przykłady modeli o dużym oraz małym współczynniku oporu prezentują zdjęcia poniżej.



Jakość powierzchni - opór modelu zależy w dużej mierze od gładkości jego powierzchni. Im bardziej szorstka powierzchnia tym większe jest tarcie opływającego powietrza o strukturę modelu. Jakość powierzchni ma większe znaczenie dla modeli poruszających się z dużą prędkością (obszar prędkości nad krytycznych), przy większych prędkościach aby uzyskać opływ laminarny (bez odrywania się strug powietrza) należy dążyć do maksymalnie gładkich powierzchni. Dotyczy to modeli silnikowych R.C. , dużych modeli szybowców (rozpiętość ponad 1,5 m) itp.

Inaczej jest z modelami poruszającymi się w zakresie małych prędkości (prędkości podkrytyczne) tutaj niewielka chropowatość nie ma większego wpływu na opór modelu. Dotyczy to modeli swobodnie latających, modeli typu slow fly, małych szybowców R.C. itp. Przy takich modelach często sztucznie zaburza się opływ skrzydła w celu uzyskania większej siły nośnej i zmniejszenia oporu skrzydeł. Elementy sztucznie zaburzające opływ skrzydeł nazywają się turbulatorami, i są bardzo często stosowane w wyczynowych konstrukcjach modeli swobodnie latających.



Z lewej strony pokazuję orientacyjny wykres dopuszczalnej chropowatości skrzydła (**K**) w funkcji liczby Reynoldsa

Liczba Reynoldsa (Re) określa podobieństwo opływu skrzydła w funkcji prędkości lotu i cięciwy skrzydła. W przybliżeniu można ją wyrazić wzorem: **Re = 70 x V x L**

V - prędkość lotu w m/s

L - cięciwa skrzydła w mm.

Dla przykładu podam wyliczenie chropowatości skrzydła dla modelu slow - fly : **Re = 70 x 4 x 180**

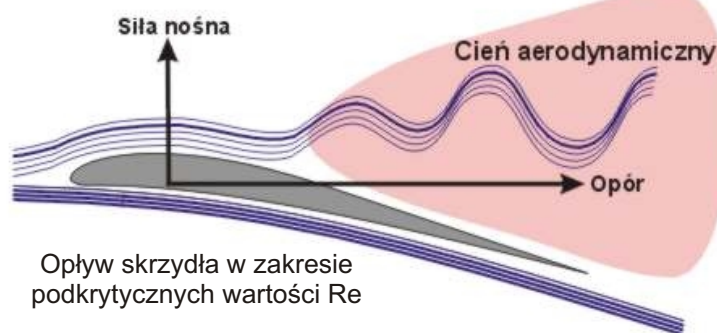
Re = 50400, z wykresu odczytujemy

L/K = ok. 0,00141

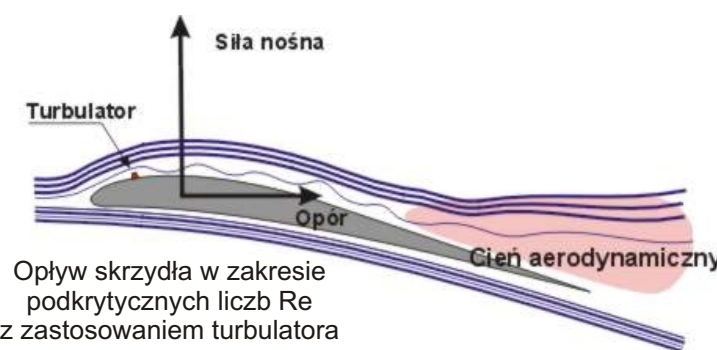
Dla cięciwy (L) 180 mm.

K = 0,00141 x 180 = 0,2538 mm.

Dla tego typu modelu nierówności powierzchni poniżej **0,25mm** nie mają wpływu na właściwości lotne. Inaczej jest z dużymi modelami, latającymi w wyższym przedziale Re , tutaj maksymalna chropowatość powierzchni nie powinna przekraczać tysięcznych części mm, co w warunkach modelarskich jest bardzo trudne do osiągnięcia.



Opływ skrzydła w zakresie podkrytycznych wartości Re



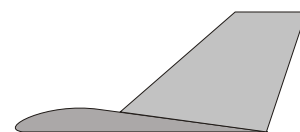
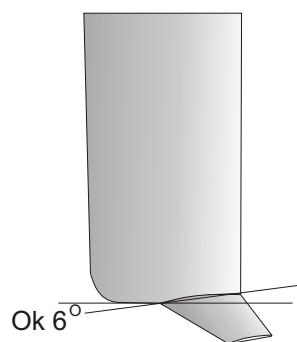
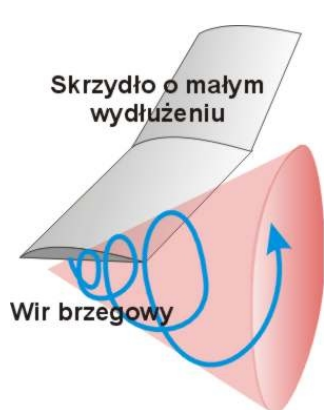
Opływ skrzydła w zakresie podkrytycznych liczb Re z zastosowaniem turbulatora

Opływ skrzydła przy małych liczbach Re (prędkość podkrytyczna) charakteryzuje się znacznym oderwaniem strug opływających skrzydło, dzieje się tak na skutek małej energii opływu powietrza, objawia się to znacznym obniżeniem doskonałości skrzydła (wzrost oporu i zmniejszenie siły nośnej) przykład pokazuje rys. z lewej strony.

W takim przypadku celowe może być zastosowanie turbulatora lub zwiększenie chropowatości powierzchni w okolicach krawędzi natarcia skrzydła. Turbulator pochłania co prawda część energii, ale powodując zaburzenia warstwy przyściennej "przysysa" strugi powietrza opływające skrzydło. Powoduje to znaczne zmniejszenie oporu skrzydła i zwiększenie siły nośnej.

Wielkość turbulatora i jego umiejscowienie należy dobrać eksperymentalnie. W praktyce dokładnie trzymujemy model do lotu w linii prostej i naklejamy turbulator na prawym skrzydle, jeśli po takim zabiegu zaobserwujemy że model ma skłonność do skrętu w lewo to znaczy że zastosowanie turbulatora przyniosło pozytywny efekt, wówczas przyklejamy turbulator na lewym skrzydle. Tendencja modelu do skrętu w lewo powinna zaniknąć. Dobór turbulatora wymaga przeprowadzenia wielu eksperymentów, najczęściej stosuje się nitkę o przekroju 0,5-0,8mm przyklejoną w odległości 3-10 % cięciwy skrzydła.

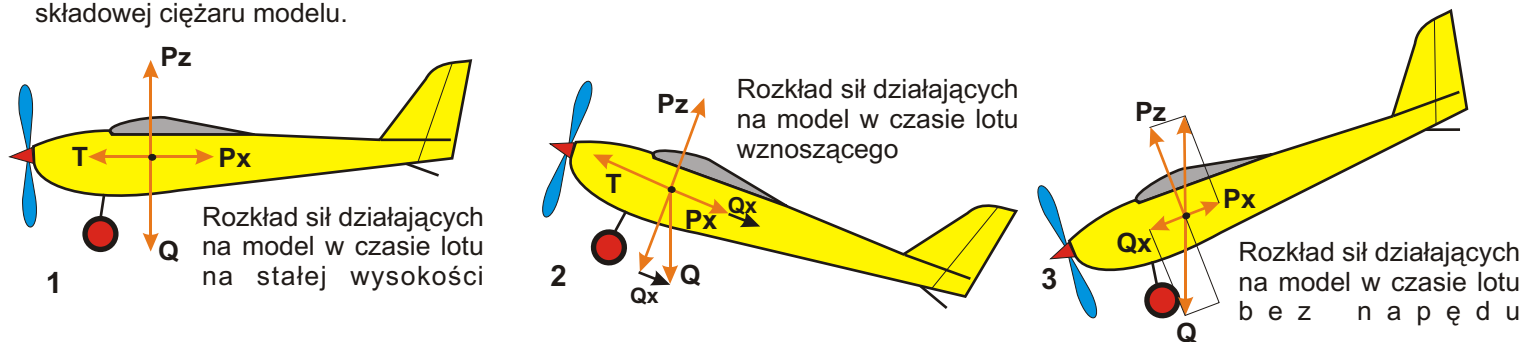
Wydłużenie skrzydła- ma wpływ na opór modelu ze względu na występowanie wirów brzegowych. Wiry brzegowe tworzą się na skutek przepływu powietrza z obszaru nadciśnienia (pod skrzydłem) do obszaru podciśnienia (nad skrzydłem) i mogą pochłaniać znaczną część energii modelu. Im większe jest wydłużenie skrzydła tym mniejsze jest znaczenie wirów brzegowych,(większa doskonałość). W praktyce aby zmniejszyć opory spowodowane wirem brzegowym stosujemy większe wydłużenia skrzydeł, zbierne skrzydła lub jego końcówki, ewentualnie rozpraszacze wirów . Kształt i kąt zaklinowania rozpraszaczy dobiera się eksperymentalnie.



Rozpraszacz wirów brzegowych

Prędkość modelu- podobnie jak siła nośna opór modelu rośnie do kwadratu prędkości, co oznacza że przy zwiększeniu prędkości modelu dwa razy opór zwiększy się czterokrotnie.

CIĄG ŚMIGŁA - Jest to siła która musi pokonać opór aerodynamiczny modelu, oraz przeciwstawić się wlocie wznoszącym składowej ciężaru modelu.



Rysunki powyżej przedstawiają rozkład sił działających na model w poszczególnych fazach lotu.

1- Lot na stałej wysokości, ciąg śmigła (T) musi pokonać opory aerodynamiczne modelu (P_x), natomiast ciężar modelu (Q) równoważony jest przez siłę nośną skrzydła (P_z).

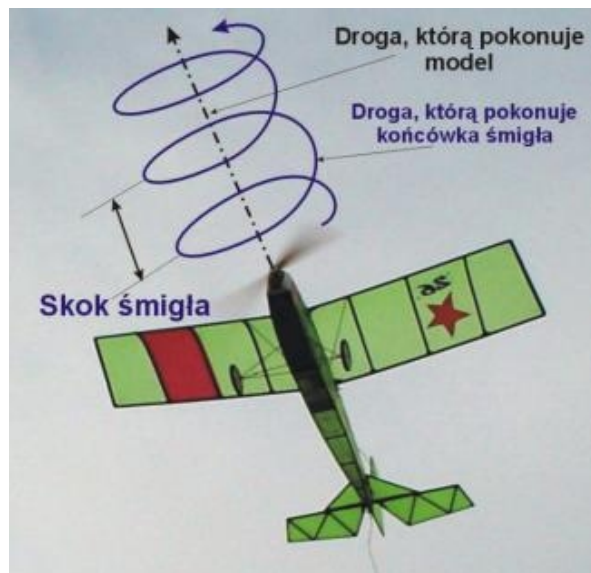
2- Lot wznoszący, ciąg śmigła oprócz oporów modelu (P_x) musi pokonać składową ciężaru (Q_x). Im większym ciągiem śmigła dysponuje model tym większy może być kąt wznoszenia modelu.

3- Lot bez napędu (ślizgowy), opory modelu równoważone są składową ciężaru, (Q_x) odbywa się to kosztem utraty wysokości, im mniejsze są opory modelu tym mniejszy jest kąt pod którym model szybuje (większa doskonałość).

Ciąg śmigła zależy od następujących czynników:

Moc silnika - rośnie do trzeciej potęgi prędkości modelu, czyli przy dwukrotnym zwiększeniu prędkości modelu zapotrzebowanie mocy wzrośnie ośmiokrotnie.

Sprawność śmigła - aby moc silnika przekształcić w siłę poruszającą model muśmy dobrać odpowiednio sprawne śmigło.



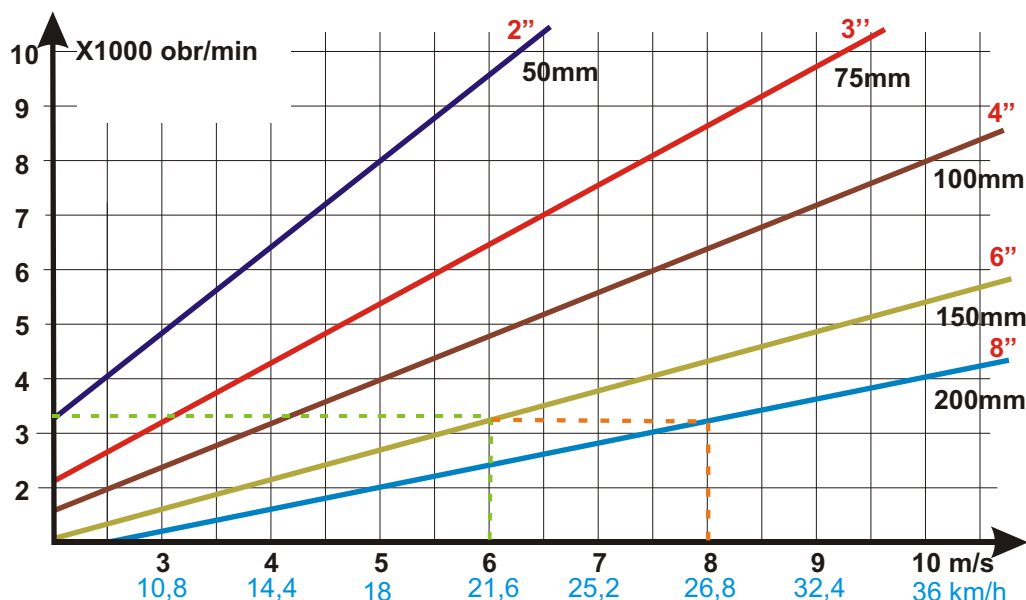
Teoretyczny dobór śmigła do mocy i obrotów silnika w przypadku konkretnego modelu jest dość skomplikowany, poza tym musimy dysponować charakterystyką śmigła wyznaczoną w tunelu aerodynamicznym dla różnych prędkości obrotowych i zakresów prędkości lotu, oraz dokładną charakterystyką aerodynamiczną modelu. W warunkach modelarskich żaden z producentów nie podaje charakterystyk śmigieł, nie mamy też możliwości przeprowadzenia badań tunelowych modelu. Pozostaje nam dobór śmigła na drodze eksperymentu. Aby jednak tego dokonać musimy znać kilka podstawowych parametrów:

Średnicę śmigła i jego skok, oraz zakres prędkości lotu modelu i prędkość obrotową śmigła.

W praktyce średnicę śmigła dobiera się do jego prędkości obrotowej, natomiast przy doborze skoku śmigła należy brać pod uwagę prędkość lotu modelu. Rozróżniamy dwa rodzaje skoku śmigła skok geometryczny (podawany przez producenta śmigła) i skok rzeczywisty, który zależy od prędkości lotu modelu. Skok rzeczywisty, jest to droga którą pokona płaszczyzna śmigła w czasie jednego obrotu. (Obrazuje to zdjęcie z lewej strony) W praktyce z dużym przybliżeniem możemy przyjąć że skok rzeczywisty przy optymalnej prędkości modelu ma wynosić ok 0,75 skoku geometrycznego.

Związek pomiędzy prędkością obrotową śmigła, skokiem geometrycznym i prędkością lotu modelu obrazuje wykres poniżej.

Przykład- Model park fly o ciężarze ok. 350 g napędzany silnikiem 280 z przekładnią 3 : 1. Prędkość lotu takiego modelu wynosi ok 6 m/s (20km/h) silnik 280 pod obciążeniem ma prędkość obrotową ok 10000 obr/ min. Przy zastosowaniu przekładni 3:1 prędkość obrotowa śmigła będzie wynosić $10000 : 3 = 3333$ obr/min, na wykresie szukamy miejsca przecięcia prędkości obrotowej z



Prędkością modelu i odczytujemy wartość skoku śmigła, dla tego przykładu minimalny skok śmigła wynosić będzie 150 mm (6"), w przypadku zastosowania śmigła o mniejszym skoku model nie będzie w stanie osiągnąć wymaganej prędkości. Jeśli zwiększymy ciężar modelu na przykład. Do 450g. To prędkość modelu zwiększy się do ok 8m/s (26 km/h) z wykresu odczytujemy wartość skoku śmigła, która w tym przypadku wyniesie ok 200mm (8") Oczywiście otrzymane wyniki są bardzo przybliżone w praktyce trudno jest dokładnie określić zarówno prędkość modelu jak prędkość obrotową śmigła w czasie lotu, Dają jednak punkt wyjścia do dalszych eksperymentów.

Na sprawność śmigła znaczący wpływ mają również : kształt łopaty i jej profil, oraz liczba łopat.

W związku z tym że łopatę śmigła należy traktować jak skrzydło na jego końcówkach występują wiry brzegowe dlatego należy wybierać śmigła o smukłych łopatach, niektóre firmy produkujące śmigła stosują zakończenia śmigieł rozpraszające wiry brzegowe (np śmigła Cam-Prop firmy Graupner)

Profil śmigła zależy od zakresu prędkości łopaty (liczby Re), dla śmigieł wolnoobrotowych (napędy z przekładnią) stosuje się profile wklęsło - wypukłe (ptasie), natomiast w śmigłach szybko - obrotowych (napęd bezpośredni) najczęściej stosowany jest profil płasko - wypukły.

Liczba łopat - w zakresie zastosowań modelarskich najczęściej stosuje się śmigła dwu łopatuowe, im mniejsza liczba łopat tym mniejszy wpływ wirów brzegowych, idealne było by śmigło jednołopatuowe, ale trudno wyobrazić sobie wyważenie takiego śmigła (śmigła jednołopatuowe stosowane są w modelach prędkich i wyścigowych na uwięzi). Śmigła trój i cztero łopatuowe stosowane są w modelach ze względów estetycznych.

Prędkość obrotowa i średnica śmigła - śmigła wolnoobrotowe o dużej średnicy mają znacznie wyższą sprawność, dlatego opłaca się zastosować przekładnię zmniejszającą obroty. W przypadku śmigieł wolnoobrotowych szczególną uwagę należy zwrócić na dobór skoku śmigła z uwzględnieniem prędkości lotu modelu (wykres doboru skoku).



Moment obrotowy śmigła - jest to siła skierowana w przeciwnym kierunku do obrotów śmigła, usiłująca obrócić model wzdłuż osi śmigła obrazuje to rysunek z lewej strony

Moment obrotowy śmigła zależy od średnicy śmigła i jego prędkości obrotowej.

Działanie momentu obrotowego powoduje tendencję do skrętu modelu w kierunku przeciwnym do obrotów śmigła. Aby temu zapobiec stosujemy kompensację poprzez wychylenie osi śmigła w bok.

Dla małych śmigieł (napęd bezpośredni) stosujemy wychylenie osi śmigła w granicach 0,5 - 1,5 stopnia, natomiast w przypadku dużych śmigieł wolnoobrotowych wychylenie osi śmigła powinno wynosić ok. 1 - 3 stopni.

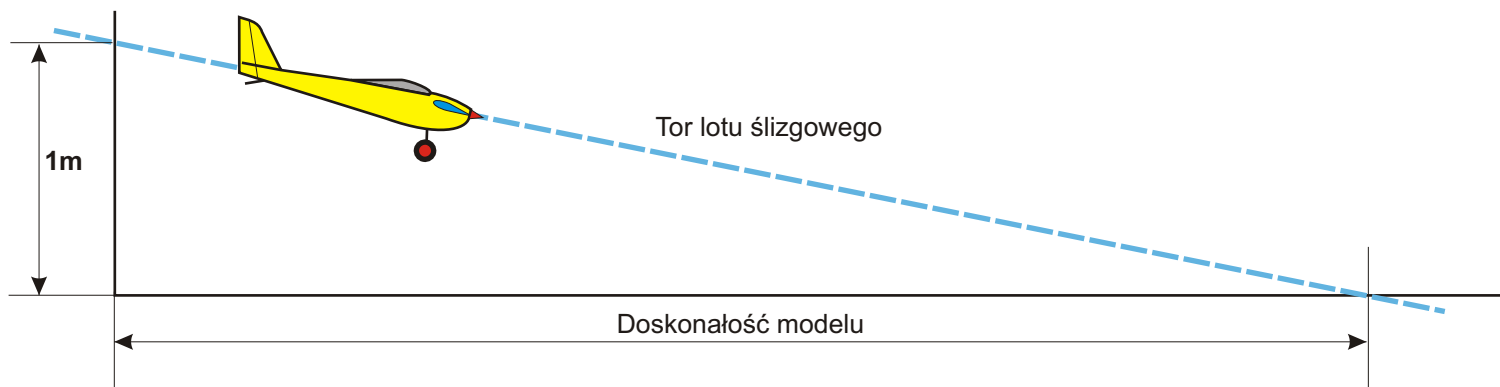
Przy dużych śmigłach moment obrotowy powoduje że model chętniej skręca w kierunku przeciwnym do obrotów śmigła natomiast skręt modelu w kierunku obrotów śmigła wymaga większych wychyleń sterów..

Masa śmigła - nie ma wpływu na własności aerodynamiczne , natomiast w niektórych przypadkach może mieć istotny wpływ na sterowność modelu. Obracające się śmigło ma właściwości żyroskopu im większa jest jego masa tym większy moment żyroskopowy. W przypadku bardzo lekkich modeli slow fly zastosowanie ciężkiego śmigła może znacznie utrudniać pilotaż modelu, objawia się to znacznym opóźnieniem reakcji modelu na stery.

Doskonałość modelu

Uniwersalnym wskaźnikiem obrazującym jakość aerodynamiczną modelu jest jego doskonałość.

Doskonałość modelu (samolotu) jest to odległość którą pokona model (samolot) w locie ślizgowym tracąc jeden metr wysokości



Doskonałość modeli typu park - slow fly mieści się w granicach 4- dla modeli 3D z profilem skrzydła w postaci płaskiej płytki do 15- starannie opracowane modele motoszybowców ze składanym śmigłem.

Dla porównania modele szybowców termicznych klasy F3J uzyskują doskonałość powyżej 20, natomiast współczesne szybowce wyczynowe klasy otwartej uzyskują doskonałości powyżej 50.

Powyższy artykuł nie wyczerpuje zagadnienia aerodynamiki a jedynie sygnalizuje występowanie podstawowych jej zjawisk z położeniem nacisku na problemy występujące przy budowie i eksploatacji modeli slow & park fly. (depronowce)

Opracowanie: S.A.U. Mariusz Wrona