

# Mierkułowa, Natalia M.

---

## Z historii powstania teorii skrzydła

---

Kwartalnik Historii Nauki i Techniki 16/2, 331-339

---

1971

Artykuł umieszczony jest w kolekcji cyfrowej Bazhum, gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych tworzonej przez Muzeum Historii Polski w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego.

Artykuł został zdigitalizowany i opracowany do udostępnienia w internecie ze środków specjalnych MNiSW dzięki Wydziałowi Historycznemu Uniwersytetu Warszawskiego.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach dozwolonego użytku.



## Z HISTORII POWSTANIA TEORII SKRZYDŁA \*

W dziejach teorii skrzydła szczególnie interesujące są lata, w których powstała współczesna teoria płata o nieskończonej rozpiętości (1906—1911), kiedy to zostały opublikowane prace koryfeusza rosyjskiej mechaniki N. E. Żukowskiego i S. A. Czapyłgina oraz uczonego niemieckiego W. Kutty. Właśnie wtedy uogólniono badania doświadczalne, zgromadzone w XIX i na początku XX w., zbudowano fizyczny model opływu profilu płata, opracowano matematyczny aparat mający na celu jego ujęcie, sformułowano podstawowe twierdzenia i postulaty skrzydła o nieskończonej rozpiętości.

W oparciu o oryginalne prace Żukowskiego, Czapyłgina i Kutty oraz niektóre materiały archiwalne, podjęliśmy próbę naświetlenia tego ważnego i decydującego okresu w dziejach współczesnej aerodynamiki, od stworzenia chronologicznej kolejności, w jakiej ukazały się te prace, a także dokonania ich analizy. Należy tutaj wspomnieć o pożytecznej pracy prowadzonej w Naukowo-Zabytkowym Muzeum N. E. Żukowskiego, gdzie są przechowywane rękopisy i korespondencja wybitnych mechaników oraz unikalne przyrządy.

Podstawowe zagadnienie teorii skrzydła, albo — jak mówiono początkowo — teorii powierzchni podtrzymującej, polega na wyjaśnieniu siły działającej na skrzydło samolotu lub ptaka, siły umożliwiającej lot ciała cięższego od powietrza. Siła ta nazywa się nośną, a jej teoria stanowi kamień węgielny współczesnej aerodynamiki.

Zaszczyt stworzenia teorii siły nośnej przypadł w udziale Żukowskiemu (lata 1904—1905). Myśl o istnieniu siły nośnej nasunęła mu po raz pierwszy analiza sił działających na lekką, wydłużoną płytkę, obracającą się wokół swej osi przy opadaniu w powietrzu. Żukowski zwrócił uwagę na doświadczenia Magnusa (1851), Mouillarda (1881) i Köpena (1902), podczas których na obracającą się w strumieniu powietrza ciało działała siła odchylająca je w kierunku prostopadłym do kierunku przepływu. Doświadczenia z obracającą się płytką przeprowadził Żukowski w 1891 r. (płytkę opadała w powietrzu), a następnie w latach 1902—1903 w tunelu aerodynamicznym Uniwersytetu Moskiewskiego; wreszcie, w latach 1904—1905 dokonał szeregu doświadczeń w Instytucie Aerodynamicznym w Kuczino. Te ostatnie doświadczenia zostały omówione w dwóch artykułach — jeden ukazał się w 1937 r. w *Dzielałach zebranych* uczonego<sup>1</sup>,

\* Skrzydło = skrzydło samolotu = płat nośny — w języku polskim ta ostatnia nazwa jest najczęściej stosowana (przyp. tłum.).

<sup>1</sup> N. J. Żukowski: *O padienii w wożduchie legkich prodolgowatych tiel, wraszczaiuszczichsia okolo svojej prodolnoj osi (statja pierwaja)*. W: *Sobranie soczinienij*. Moskwa 1937. T. 5 s. 72—81. Zob. również *Sobranie soczinienij*. Moskwa 1949. s. T. 4 s. 41—50.

a drugi — w 1906 r. w Biuletynie Instytutu w Kuczino<sup>2</sup>. W artykułach tych podał Żukowski matematyczną analizę obserwowanych zjawisk i dowiódł ogólnego hydrodynamicznego twierdzenia o sile działającej na ciało symetryczne znajdujące się początkowo w ruchu obrotowym (do koła osi symetrii — przyp. tłum.) i pozostające w płaskim, równoległym strumieniu powietrza, skierowanym prostopadle do osi obrotu ciała. Zgodnie z tym twierdzeniem, siła  $P$  równa się  $\rho V \Gamma$ , gdzie  $\rho$  — gęstość ośrodka,  $V$  — prędkość strumienia w nieskończoności,  $\Gamma$  — cyrkulacja prędkości po konturze zamkniętym (obejmującym badane ciało — przyp. tłum.). Dowód tego twierdzenia oparł Żukowski na obserwacji łączenia się wirów wewnątrz opływającego konturu, jednak nie wprowadzał tutaj jeszcze pojęcia wirów związanych. Uczynił to w swojej słynnej pracy *O wirach związanych*<sup>3</sup>, referowanej w Moskiewskim Towarzystwie Matematycznym dn. 28 listopada 1905 r. (i opublikowanej w 1906 r.). Wprowadzone przez Żukowskiego wiry nie są związane z przepływającym płynem — pozostają przy jego przepływie nieruchome. Nowe pojęcie wiru, podane przez Żukowskiego, różni się w pewnym sensie od wirów klasycznej teorii Helmholtza, według której wiry charakteryzują stan przepływającego płynu; jednocześnie jest ono z tą teorią zgodne, ponieważ wiry związane wytwarzają takie samo pole wirowe, jak wiry Helmholtza. Pomysł zastąpienia równomiernie opływającego ciała wirami związanymi pozwolił Żukowskiemu rozwiązać zagadnienie określenia sił hydrodynamicznych, działających na ciało znajdujące się w płaskim przepływie równoległym. Wypadkowa tych sił skierowana jest prostopadle do prędkości przepływu w nieskończoności, powstaje zaś w wyniku nałożenia się ruchów: postępowego i (pochodzącego od wirów związanych) obrotowego.

W rok po opublikowaniu pracy Żukowskiego *O wirach związanych* ukazała się książka F. Lanchestera *Aerodynamika*<sup>4</sup>, w której autor wprowadził pojęcie ruchu peryptoroidalnego — przepływu wirowego opływającego zamknięty kontur z różną od zera cyrkulacją. Nie rozpatrywał on jednak ani wielkości, ani kierunku siły działającej na ciało przy tym ruchu.

Zatem Żukowski odkrył istotę powstawania siły prostopadłej do strumienia, istotę siły odchylającej od pionu spadającą, obracającą się płytkę, siły powstającej przy doświadczeniach z walcem obracającym się w strumieniu powietrza. Ale również i wtedy był on jeszcze daleki od myśli, że taka mianowicie jest natura siły utrzymującej samolot w locie. Chodzi o to, że zastosowanie twierdzenia Żukowskiego do określenia sił aerodynamicznych skrzydła, stanowiącego pewien zamknięty kontur, wiąże się ze znalezieniem wielkości cyrkulacji po (dowolnym — uzup. tłum.) konturze obejmującym skrzydło. Profil skrzydła ma ostrą (tylną) krawędź, na której teoretycznie otrzymywało się nieskończenie duże prędkości, toteż znalezienie wielkości cyrkulacji wzdłuż konturu obejmującego takie ciało nie było możliwe. Z tych względów Żukowski usiłował określić siłę nośną za pomocą hydrodynamicznej teorii strug, do której wniósł ważny wkład w postaci swej pracy z 1890 r. zatytułowanej *Modyfikacja metody*

<sup>2</sup> N. Joukowski: *De la chute dans l'air des corps légers de forme allongée, animés d'un mouvement rotatoire*. „Bulletin de l'Institut Aérodynamique de Koutchino” Fasc. 1. Zob. również N. J. Żukowski, jw. T. 4 s. 51—68.

<sup>3</sup> N. J. Żukowski: *Sobranie sozcinenij*. T. 4 s. 69—91.

<sup>4</sup> F. Lanchester: *Aerodynamics*. London 1907.

Kirchoffa w celu określenia ruchu dwuwymiarowego płynu przy ruchu stałym występującym w nieznannej linii strumienia<sup>5</sup>. W r. 1908 Żukowski otrzymał wzór na siłę „podtrzymującą” w przypadku odrywania się strumienia od brzegów lekko wygiętej płytki, przy czym jej kształt nie mógł być z góry określony<sup>6</sup>. Takie samo rozwiązanie podał nieco wcześniej S. A. Czapłygin. Również w 1908 r., i w tym samym artykule, rozpatrywał Żukowski siły działające na kontur mocno spłaszczonej elipsy, znajdującej się w strumieniu niewirowym o różnej od zera cyrkulacji prędkości wokół konturu. Widocznie była to próba przybliżenia obrysu z ostrą krawędzią do obrysu bez ostrza. Żukowski dowiódł, że dla takiego obrysu siłę nośną określa się na podstawie twierdzenia o wirach związanych, co stanowiło krok naprzód, jeśli idzie o zagadnienia opływu profilu skrzydła — profilu z ostrą krawędzią spływu.

Na pracę Żukowskiego *O wirach związanych* zwrócił w 1909 r. uwagę profesor Monachijskiej Politechniki, S. Finsterwalder w odczycie wygłoszonym na zjeździe szwajcarskich przyrodników<sup>7</sup>. Opublikowanie przez Żukowskiego twierdzenia o wirach związanych zachęciło widocznie Finsterwaldera do wzmianki o podsunętej w 1902 r. jego uczniowi, W. Kutcie, myśli przestudiowania opływu wygiętej płytki oraz udzielenie mu w 1909 r. radzie kontynuowania tych badań. W tym samym odczycie Finsterwalder zreferował wyniki otrzymane przez Kuttę w 1902 r. Sam Kutta ogłosił treść swojej pracy (w związku z wakującym miejscem nauczyciela) w niewielkiej notatce<sup>8</sup>. Przytacza on w niej wzory na funkcję prądu i siłę nośną w szczególnym przypadku lekko wygiętej wzdłuż obrysu płytki przy kącie natarcia równym zeru. Kutta rozważa tu dwuwymiarowe zagadnienie, w którym powierzchnię walcową zastępuje układ wirów. W 1909 r., „inspirowany ponownie przez profesora Finsterwaldera”, Kutta zajął się znów zagadnieniem opływu ciał związanych z zagadnieniem lotu. Wynikiem tego był jego odczyt, wygłoszony 8 stycznia 1910 r., na posiedzeniu Bawarskiej Akademii Nauk. Na tej pracy Kutty zatrzymamy się bardziej szczegółowo później, na razie zaś omówimy dokonaną przez niego w 1902 r. ocenę swoich wyników. W pracy<sup>9</sup> z 1910 r. Kutta rozpatruje te wyniki jako „prawo ogólne”, „wówczas ustalone i następnie ponownie znalezione przez Żukowskiego”, przy czym powołuje się na biuletyn Instytutu Aerodynamicznego w Kuczino, t. I, 1906 r., w którym zostało po raz pierwszy opublikowane twierdzenie Żukowskiego o wirach związanych. Udowadnianie niesłuszności takiego mniemania Kutty jest zbędne. Jednocześnie staje się oczywiste, że Kutta w 1909 r. powrócił do swoich badań, dotyczących siły nośnej, w związku z ogłoszeniem twierdzenia Żukowskiego.

Istnieją podstawy do przypuszczeń, że Żukowski w 1909 r. omawiał

<sup>5</sup> „Matiematiczeskij sbornik” T. 15: 1890 s. 121—278. Zob. również N. J. Żukowski: *Sobranie sočinienij*. T. 2 s. 489—626.

<sup>6</sup> N. J. Żukowski: *O podsazywajuszczem diejstwiu potoka wozducha na plastinku*. W: *Sobranie sočinienij*. T. 2 s. 697—706.

<sup>7</sup> S. Finsterwalder: *Die Aerodynamik als Grundlage der Luftschiffahrt*. „Zeitschrift für Flugtechnik und Motorluftschiffahrt” (ZFM) 1910 H. 1 i 2 s. 6—10, H. 3 i 4 s. 30—31.

<sup>8</sup> W. M. Kutta: *Auftriebskräfte in strömenden Flüssigkeiten*. „Illustrierte Aeronautische Mitteilungen” 1902 H. 3 s. 133—135.

<sup>9</sup> W. M. Kutta: *Über eine mit den Grundlagen des Flugsproblems in Beziehung stehende zweidimensionale Strömung*. München 1910.

z Czapyłginem zagadnienie opływu profilu płata<sup>10</sup>. Nie widząc możliwości zastosowania twierdzenia Żukowskiego dla znalezienia siły nośnej, Czapyłgin szukał dla tej siły innego wytłumaczenia. Czapyłgin sądził, że jednym ze źródeł siły nośnej przy analizie teoretycznej są „osobliwości nieskończenie oddalonego punktu przepływu i związana z nim wieloznaczność potencjału prędkości”<sup>11</sup>. Źródło to nazywa Czapyłgin trzecim, przyjmując za źródło pierwsze powstawanie strug, a za źródło drugie — wiry związane. Jego zdaniem więc siła nośna powstaje „wskutek powstania cyrkulacji prędkości wokół nieskończenie oddalonego punktu. W tym przypadku wiry mogą wcale nie istnieć w obszarze zajętym przez płyn — nieobecne są również wyobrażalne wiry związane wewnątrz stanowiącego przeszkodę walca...”<sup>12</sup>. Dalej rozumuje Czapyłgin w następujący sposób: ponieważ prędkości są w całym przepływie skończone i ulegają ciągłym zmianom, przy równomiernym opływie profilu płata nie może w jego tylnej zaostrej krawędzi powstawać nieskończenie duża prędkość. A skończona prędkość możliwa jest tylko wtedy, kiedy tylna krawędź stanowi punkt spływu strug albo punkt rozdzielania się strumienia. Powyższe rozważania stanowią treść znanego postulatu o spływie strug z ostrej tylnej krawędzi płata. Wykorzystując ten postulat oraz „trzecie źródło ciśnienia”, Czapyłgin znalazł wzór na siłę działającą na łuk koła przy zerowym kącie natarcia oraz na profil z „nasadką” przy różnych kątach natarcia, opisał też opływ profilu otrzymywany poprzez inwersję paraboli. Poza tym Czapyłgin wyprowadził wzór na moment siły aerodynamicznej profilu płata przy różnych kątach natarcia. Wszystko to zostało zawarte w jego odczycie *O ciśnieniu wywieranym przez płaski przepływ równoległy na umieszczone w nim ciała (do teorii samolotu)*<sup>13</sup>, wygłoszonym w Moskiewskim Towarzystwie Matematycznym w lutym 1910 r.

Żukowski docenił doniosłość postulatu Czapyłgina, który umożliwił rozpatrzenie opływu niektórych profili skrzydeł. Jednak rozwiązanie Czapyłgina nie było ogólne; znalezienie takiego rozwiązania widział Żukowski w zastosowaniu twierdzenia o wirach związanych dla określenia cyrkulacji prędkości wokół profilu płata. Żukowski podał metodę, łączącą dwa podstawowe pojęcia — o wirach związanych i o spływie strug z tylnej krawędzi płata. Właśnie to pozwoliło mu stworzyć ogólną teorię profilu skrzydła.

Podstawową pracę na ten temat zaczął Żukowski pisać przypuszczalnie pod koniec 1909 r., a skończył ją na początku 1910 r.<sup>14</sup>.

Widać wyraźnie, że o notatce Kutty z 1902 r.<sup>15</sup> dowiedział się Żukowski z cytowanego powyżej odczytu Finsterwaldera (opublikowanego w styczniu 1910 r.). W 1910 r. Żukowski pisał, że Kutta „znalazł funkcję prądu dla bezwirowego przepływu płynu nieściśliwego dwuwymiarowego, który opływa łuk koła  $ABC$  i ma w nieskończoności prędkość  $V$ , skier-

<sup>10</sup> Do takiego wniosku można dojść na podstawie notatek Żukowskiego na rękopisach i oddzielnych kartkach, przechowywanych w Naukowo-Zabytkowym Muzeum N. J. Żukowskiego.

<sup>11</sup> S. A. Czapyłgin: *O dawlenii płoskoparallelnogo potoka na pregrażdajuszczie tiera (k teorii aeroplana)*. W: *Sobranie sozczinienij*. T. 2. Moskwa 1948 s. 185

<sup>12</sup> Tamże s. 186.

<sup>13</sup> Tamże s. 184—229.

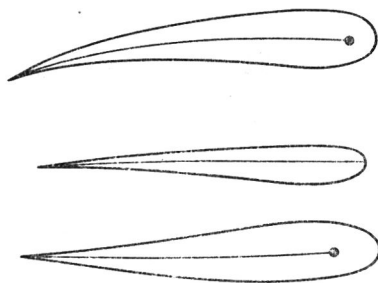
<sup>14</sup> Archiwum Naukowo-Zabytkowego Muzeum N. J. Żukowskiego, skarbiec, pudełko 3, nr inwent. 9/1—9/4.

<sup>15</sup> N. J. Żukowski: *Sobranie sozczinienij*. T. 4 s. 96.

rowaną wzdłuż cięciwy łuku. Stwierdził on, że taki przepływ wywołuje siłę ciśnienia  $P$  skierowaną wzdłuż średniego promienia  $OB = a$  ze środka  $O$  i wyraża się wzorem  $P = 4\pi a \sin^2 \frac{\alpha}{2} \rho V^2$ , gdzie  $2\alpha$  — kąt odpowiadający łukowi  $ABC = f$ , oraz  $\rho$  — gęstość płynu<sup>16</sup>. Być może, z tego względu Żukowski nadał z początku swojej pracy o teorii skrzydła tytuł *Uogólnienie przepływu Kutty (Die Verallgemeinerung der Kutta'sche Strömung)*, a w redakcji ostatecznej — *Geometryczne badania przepływu Kutty*<sup>17</sup>.

Według Firstenwaldera wzór Kutty zawiera cyrkulację w postaci ukrytej. Jednak na podstawie notatki Kutty raczej nie można tego ustalić. Żukowski pisał, że przepływ Kutty (1902 r.) stanowi szczególny przypadek przepływów przedstawionych przez Czapłygina.

Żukowski podzielił się swoimi uwagami na temat notatki Kutty z Czapłyginem, kiedy praca tego ostatniego *O ciśnieniu płaskiego przepływu równoległego...* była w druku, czyli na początku 1910 r.<sup>18</sup>. *Geometryczne badania przepływu Kutty* zostały opublikowane w Pracach Oddziału Nauk Fizycznych w 1911 r. Jednak jeszcze wcześniej, bo w 1910 r., Żukowski streścił dla czasopisma „ZFM” teoretyczną część swoich badań. Streszczenie to ukazało się 26 listopada 1910 r. pt *O konturach podtrzymujących powierzchni samolotu*<sup>19</sup>. Zrobił je Żukowski za radą L. Prandtla. Przytaczamy tekst listu Żukowskiego do L. Prandtla: „Zgodnie z Pana radą streściłem teoretyczną część mojej pracy z powołaniem się na artykuł zamieszczony w Pracach Oddziału Fizycznego, w których część teoretyczna będzie wydrukowana w całości. Streszczenie to, w którym podany zostanie bez dowodu sposób obudowy dwóch obrysów we wskazanej postaci (patrz rys. 1 — N. M.) posłuży za wstęp do



Ryc. 1.

praktycznej części artykułu, rozpoczynające 8 rozdział przesłanego przeze mnie rękopisu. W celu umożliwienia mi dokonania streszczenia, uprzejmie proszę o zwrot oryginału pod adresem: Moskwa, Politechnika. Prze-

<sup>16</sup> Tamże s. 139.

<sup>17</sup> N. Joukovsky: *Geometrische Untersuchungen über der Kutta'sche Strömung*. „Trudy otdielenija fiziceskich nauk obszczestwa lubitielej jestiestwoznaniija” (OFNOLJ) T. 15: 1911 (wyd. 1), T. 15: 1912 (wyd. 2). Zob. też N. J. Żukowski: *Geometrieskije issledowanija o tieczenii Kutta*. W: *Sobranie sozinienij*. T. 4 s. 139—178.

<sup>18</sup> S. A. Czapłygin, jw. T. 2 s. 196.

<sup>19</sup> N. Joukovsky: *Über die Konturen der Tragflächen der Drachenflieger*. „ZFM” 1910 H. 22 (26 November), 1912 H. 6 (30 März). Zob. też *Sobranie sozinienij*. T. 4 s. 92—116.



prowadzane przeze mnie doświadczenia polegają na porównaniu sił oporu napotykaných w płynie przez rozpatrywane kształty z siłami ciśnienia na cienkie blaszane płytki narysowane wewnątrz wskazanych na rysunku konturów..."<sup>20</sup>.

Z powyższego listu wynika, że L. Prandtl zapoznał się z rękopisem *Geometryczne ładania przepływu Kutty* jeszcze przed jego opublikowaniem oraz przed wydrukowaniem artykułu *O konturach podtrzymujących powierzchnię samolotu* w listopadzie 1910 r., czyli pod koniec 1909 i na początku 1910 r. W ten sposób ogólne rozwiązanie zagadnienia opływu skrzydeł samolotu podał Żukowski pod koniec 1909 i na początku 1910 r., a więc przed ukazaniem się w druku w 1910 r. pracy Kutty *O dwuwymiarowym przepływie, związanym z podstawowym zagadnieniem lotu*<sup>21</sup>. Z tą pracą Kutty zapoznał się Żukowski w trakcie druku jego artykułu w *Pracach Oddziału Nauk Fizycznych* w 1911 r. W odsyłaczu do 8 rozdziału swojego artykułu Żukowski pisał, że podchodząc z innego punktu widzenia on i Czapłygin otrzymali na siłę nośną takie same wzory, jakie figurują w pracy Kutty<sup>22</sup>. A w streszczeniu tego artykułu dla czasopisma „ZFM” pisał już: „Na początku 1910 r. W. Kutta uzupełnił i opublikował swoje badania, przy czym też otrzymał wzór (2) (wzór na siłę nośną łuku koła z okrągłą nasadką na przedniej krawędzi przy kącie natarcia różnym od zera — N.M.) wyprowadzony przez S. A. Czapłygina”<sup>23</sup>.

W pracy Kutty zainteresował Żukowskiego „ciekawy punkt widzenia” na powstawanie ssącej siły w kierunku przepływu przy przedniej krawędzi płytki o ostrych brzegach. Uważając, że „w teorii powierzchni nośnych samolotu najtrudniejsze jest określenie siły oporu działającej w kierunku przepływu”<sup>24</sup>, Żukowski usiłował tę siłę określić. Sądził on, że powoduje ją „łączenie się wirów powstających przy przedniej krawędzi”<sup>25</sup>. Wtedy przy przedniej krawędzi powstaje wir; zastosowanie do niego twierdzenia o wirach związanych daje rozwiązanie zadania. Żukowski wcale nie rozpatrywał wyników Kutty z 1910 r. o sile nośnej podtrzymującej powierzchnię. Jest rzeczą oczywistą, że po rozwiązaniu podanym przez Czapłygina i Żukowskiego praca Kutty z 1910 r. nie wniosła do zagadnienia nic nowego.

Celem Żukowskiego było naturalnie podanie ogólnego rozwiązania zagadnienia siły nośnej na podstawie zastosowania twierdzenia o wirach związanych. W *Geometrycznych badaniach...* Żukowski pisał: „W artykule tym wyprowadzam równania otrzymane przez W. Kuttę (równanie z 1902 r. — N. M.) i S. A. Czapłygina, w oparciu o wspomniane przed chwilą twierdzenie...”<sup>26</sup>. Skomplikowane zagadnienie określenia cyrkulacji rozwiązał Żukowski wykorzystując postulat spływu strug z ostrej krawędzi profilu przy opływie równomiernym. W ten sposób znalazł on klucz do wyjaśnienia przyczyny powstawania siły nośnej, stworzył teorię profilu płata, opracował metodę określającą wielkość siły nośnej oraz metodę budowy profilów skrzydeł. Rozpatrując konforemne odwzorowa-

<sup>20</sup> *Iz nieopublikowanej pieriepski N. J. Żukowskiego (matieriały k biografii). K stoletiju so dnia roždienija*. Moskwa 1957 s. 70.

<sup>21</sup> W. M. Kutta, *Über...* jw.

<sup>22</sup> N. J. Żukowski: *Sobranie soczinienij*. T. 4 s. 159.

<sup>23</sup> Tamże s. 96.

<sup>24</sup> Tamże s. 174.

<sup>25</sup> Tamże s. 176.

<sup>26</sup> Tamże s. 142.

nie przepływu wokół walca (parametry fizyczne przepływu określane są w sposób ogólnie znany) w przepływ wokół profilu skrzydła oraz wychodząc z założenia, że krytyczny punkt przepływu na walcu przekształca się w punkt ze skończoną prędkością w ostrzu profilu, Żukowski udowodnił tezę stanowiącą ostateczne rozwiązanie zagadnienia. Powyższa teza sprowadza się do stwierdzenia, że w odwzorowanym przepływie płynu cyrkulacja prędkości wzdłuż obwodu zamkniętego, obejmującego ciało, pozostaje taka sama jak w przepływie pierwotnym.

Wykorzystując podane przez Czapłygina odwzorowanie podobne (konformne) Żukowski podał geometryczną metodę zbudowania obszaru leżącego poza łukiem koła, wzdłuż punktów obszaru znajdującego się poza okręgiem mającym taki sam promień, co łuk koła. Za pomocą tego odwzorowania otrzymał Żukowski sposób zbudowania profilu skrzydła. Stosując ogólne twierdzenie o wirach związanych oraz tezę, że cyrkulacja wokół profilu równa się cyrkulacji wokół walca, otrzymał on wzór na określenie siły nośnej, działającej na profil lotniczy.

Zastosowana przez Kuttę metoda badawcza jest analogiczna do metody Żukowskiego omówionej przez tego ostatniego w 1908 r. w odczycie *O zasyającym działaniu przepływu powietrza na płytkę*. Podobnie jak Żukowski rozpatrywał Kutta potencjał zespolony, złożony z trzech składowych — potencjału zespolonego, odpowiadającego przepływowi w nieskończoności wzdłuż osi OX przy cyrkulacji prędkości wzdłuż opływającego konturu równej zeru; odpowiadającego przepływowi w nieskończoności, skierowanemu wzdłuż osi OY, przy cyrkulacji prędkości równej zeru; oraz odpowiadającego przepływowi, w którym cyrkulacja prędkości opływającego konturu jest różna od zera. Wykorzystując metodę odwzorowania podobnego otrzymał Kutta poszukiwany potencjalny opływ płytki płaskiej lub łukowej ze znanego opływu walca. Podobnie jak Czapłygin i Żukowski, Kutta uważał, że powstawania nieskończenie dużej prędkości w tylnej krawędzi można uniknąć traktując tylną krawędź jako punkt spływu strug. Natomiast przy przedniej krawędzi powstaje nieskończenie duża prędkość, a zatem powstaje podciśnienie, czyli siła ssąca, na co już wskazywał Żukowski w 1908 r. Siła ta jest zwrócona w kierunku przeciwnym do przepływu wzdłuż stycznej do płytki przy przedniej krawędzi. Kutta sądził, że siła nośna składa się z dwóch części — wypadkowej ciśnienia na poszczególne części płytki oraz składowej siły ssącej.

Zdawałoby się, że praca Żukowskiego *Geometryczne badania przepływu Kutty* całkowicie rozwiązała zagadnienie o dynamicznym oddziaływaniu powietrza na skrzydło. Żukowski kontynuuje jednak swoje badania związane z aerodynamiką płata. Dąży do poznania zagadnienia oporu profilu. Jednocześnie interesuje go rozwiązanie zagadnienia położenia środka parcia dla profiliów płatów oraz wielkości momentu siły nośnej. Żukowski podejmuje teoretyczne badania profiliów stosowanych w tym czasie do samolotów, mianowicie profiliów typu „Antoinette”<sup>27</sup>. Wszystkie te zagadnienia rozwiązał Żukowski w pracy pt. *O płatach nośnych*

<sup>27</sup> Profil typu „Antoinette” stanowi obrys ograniczony przez dwa przecinające się łuki okręgu w ten sposób, że powstawał profil sierpowy. Przepływ nieściśliwego płynu idealnego wokół takiego profilu otrzymał Żukowski za pomocą podwójnego odwzorowania podobnego przepływu w górnej półpłaszczyźnie, tworzącego się wskutek ruchu walca o bardzo małej średnicy, wewnątrz którego znajduje się wir z cyrkulacją.



typu „Antoinette”<sup>28</sup>, opublikowanej po raz pierwszy w 1911 r. W tym samym roku, w maju, streszczenie tego artykułu było referowane w Moskiewskim Towarzystwie Matematycznym.

Oprócz profilów typu „Antoinette” otrzymał Żukowski również profile z zaokrągloną krawędzią przednią, wśród nich profil identyczny z profilem Czapyłgina (profil typu inwersji paraboli). Dla profilów rozmaitych typów znaleziono wzory na siłę nośną i moment siły aerodynamicznej. Ostatni wzór przy określonym doborze zawartego w nim parametru był zgodny z odpowiednim wzorem, podanym przez Czapyłgina w pracy z 1910 r.

W 1911 r. została opublikowana praca Kutty *Plaskie cyrkulacyjne przepływy oraz ich zastosowanie w technice lotu*<sup>29</sup>, którą autor zreferował w Bawarskiej Akademii Nauk w lutym 1911 r. Praca Kutty, podobnie jak omówiona praca Żukowskiego, poświęcona była badaniu płatów o profilach sierpowych. Nie będziemy tu omawiali otrzymanych przez Kuttę wyników, gdyż w odniesieniu do pracy Żukowskiego nie wniosły one nic nowego.

Podsumujemy teraz niektóre wyniki.

Stworzenie współczesnej teorii płata o nieskończonej rozpiętości wiąże się z nazwiskami N. E. Żukowskiego, S. A. Czapyłgina, W. Kutty i F. Lanchestera. Zasady tej teorii zawarte są w podstawowych badaniach Żukowskiego z lat 1904—1905, ukoronowanych sformułowaniem ogólnego hydrodynamicznego twierdzenia o sile wywołanej działaniem wirów związanych. Notatka Kutty z 1902 r., w której rozważane jest nader szczególne zagadnienie, nie wywarła w tamtych czasach żadnego wpływu na kształtowanie się poglądów co do siły nośnej i gdyby Finsterwalder w 1909 r., a Żukowski w 1910 r. nie poddali jej analizie, pozostałaby ona nie dostrzeżona przez mechaników.

Żukowski i Czapyłgin pierwsi w świecie opracowali teorię płata w płaskim równoległym przepływie, stworzyli profile lotnicze oraz ustalili sposób ich budowy, a także znaleźli wzory na określenie oddziaływania powietrza na skrzydła samolotu. Profile takie nazywano już wówczas profilami teoretycznymi, profilami Żukowskiego lub profilami typu inwersji paraboli, później zaś profilami Żukowskiego—Czapyłgina.

Wraz z powstaniem teorii płata o nieskończonej rozpiętości powstał w mechanice ośrodków ciągłych nowy kierunek — aerodynamika. Nauka o ruchu ciał w powietrzu, o aerodynamicznym oddziaływaniu na ciało, stała się nauką samodzielną. Do mechaniki ośrodków ciągłych wniesione zostały nowe pojęcia z zakresu fizyki przepływu, pojęcia pozwalające rozwiązywać nowy szeroki krąg zagadnień.

Przy opracowywaniu niniejszego artykułu autor uwzględnił rady i uwagi akademika S. A. Christianowicza, dotyczące niektórych poruszanych tutaj zagadnień.

Autor uważa za swój obowiązek podziękować S. A. Christianowiczowi oraz N. M. Siemionowej, naukowemu kierownikowi Naukowo-Zabytkowego Muzeum N. E. Żukowskiego, za uprzejme udostępnienie materiałów archiwalnych oraz pomoc okazaną przy wyszukiwaniu dokumentów.

<sup>28</sup> „Trudy OFNOLJ” T. 4: 1911 s. 7—20 oraz *Sobranie soczinienij*, t. 4 s. 179—206.

<sup>29</sup> W. M. Kutta: *Über ebene Zirkulationsströmungen nebst flugtechnischen Anwendungen*. München 1911.

## ИЗ ИСТОРИИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ТЕОРИИ КРЫЛА

В статье проведен анализ и описана хронология издания работ двух русских ученых Н. Е. Жуковского и С. А. Чаплыгина, а также немецкого ученого В. Кутты за 1906—1911 годы, в которых была сформулирована теория крыла (несущей плоскости самолета). Эта теория сыграла существенную роль в развитии аэродинамики.

## FROM THE HISTORY OF THE THEORY OF THE WING

The article analyses and reconstructs the chronology according to which the works of two Russian scholars appeared: N. Evgeny Zhukovsky and S. Chaplygin as well as the work of the German scientists W. Kutta. All these papers appeared in 1906—1911 and in them the theory of the wing (the carrying panel of an airplane) was formulated. This theory played an important role in the development of aerodynamics.