

**KATASTROFA TU-154M PLF 101: KONFRONTACJA OBLICZEŃ  
TRAJEKTORII LOTU ZE ZNISZCZENIMI NAZIEMNYMI  
I ZAPISEM DŹWIĘKU W KOKPICIE**

PAWEŁ ARTYMOWICZ

*Depts. of Physical Science, and Astronomy & Astrophysics, University of Toronto, Canada  
e-mail: pawel@utsc.utoronto.ca*

W dn. 10.04.10 polski rządowy Tupolew 154M zderzył się z obiektami naziemnymi (drzewami) na podejściu do pasa 26 lotniska Siewiernyj w Smoleńsku. Po uderzeniu na wysokości około 6.5 m w brzozę o średnicy pnia około 44 cm na działce lekarza Bodina, samolot utracił ok. 1/3 lewego skrzydła, wzniósł się i wykonał obrót (półbeczkę) zanim doznał znacznej fragmentacji w kolizji z częściowo porośniętym terenem. Szczegóły ostatnich sekund lotu są od lat kontestowane. Wysuwane są liczne, alternatywne propozycje dotyczące zarówno miejsca urwania skrzydła, kąta obrotu w beczcze, trajektorii lotu i jej zgodności bądź rozbieżności z danymi z rejestratorów systemu TAWS i FMS. Jednak badania ostatnich 5 sekund lotu uszkodzonego tupolewa metodami aerodynamiki i mechaniki bryły sztywnej prowadzą do wyników opisanych w referacie, nie pozostawiając wątpliwości co do przebiegu katastrofy. Utrata końcówki skrzydła musiała nastąpić na brzozie Bodina (z dokładnością 5m). W przypadku znacząco późniejszej utraty siły nośnej na lewym skrzydle, obrót w chwili upadku nie narosłby do 150 stopni, znalezionych przez Komisję Badania Wypadków Lotniczych, zaś liczne drzewa na trasie samolotu nie zostałyby ścięte na zaobserwowanej wysokości ani pod zarejestrowanym kątem. Również ułożenie kadłuba w stosunku do ziemi w momencie przyziemienia różniłoby się znacznie od faktycznego. Te ostatnie wnioski otrzymano dołączając czwarty stopień swobody (ślizg, yaw) do uprzednio istniejącego modelu autora z tzw. zredukowanymi stopniami swobody. Trajektoria lotu nie różni się znacznie od otrzymanej poprzednio. Ślizg i związane z nim odchylenie osi kadłuba w momencie zderzenia z ziemią od kierunku lotu wynosi około 20 stopni.

Klamrą spinającą trzy główne źródła wiedzy o końcówce lotu: (a) symulację dynamiczną płatowca, (b) zapisy rozlicznych rejestratorów parametrycznych PLF 101, oraz (c) rozkład drzew i szczątków, okazał się zapis na taśmie CVR (rejestratora głosu w kokpicie). W odróżnieniu od pewnych uprzednich interpretacji i odczytów oficjalnych, analiza CVR wykazała, iż zarejestrowany został tam szereg zdarzeń: ścinanie kilku zasadniczych zlokalizowanych jak i rozciągniętych obiektów na obliczonej teoretycznie trasie lotu, a także przelot nad obszara-

mi wolnymi od przeszkód terenowych. Z dokładnością sięgająca niekiedy 0.03s w czasie i 2m położenia na mapie, udało się odnaleźć w CVR moment ścięcia kadłubem małej kępy drzew przed brzoza Bodina, uderzenia w nią sama, jak i innych krytycznych punktów trajektorii. W sprzeczności z teoriami alternatywnymi, trajektoria lotu przechodzi przez punkty zarejestrowane w urządzeniach TAWS i FMS i jest z nimi zgodna czasowo.

Wielostronna analiza fizyczna tragicznej końcówki lotu PLF 101 wyklucza eksplozje i rozpad kadłuba samolotu w powietrzu. Spowodowałyby one diametralnie różne trajektorie i ułożenie szczątków. Przeczyłyby także analizom laboratoryjnym i relacjom świadków.

**ML-XVI 2014**

**THE CATASTROPHE OF TU-154M PLF 101: CONFRONTATION OF  
THE COMPUTATIONS OF FLIGHT TRAJECTORY WITH THE  
GROUND DAMAGE AND COCKPIT VOICE RECORDER**

PAWEŁ ARTYMOWICZ

*Depts. of Physical Science, and Astronomy & Astrophysics, University of Toronto, Canada  
e-mail: pawel@utsc.utoronto.ca*

On 10.04.10 the Polish Tupolev 154M collided with trees on approach to runway 26 at the Severnyi airport in Smolensk. Following a collision at a height of about 6.5 m with a birch located on the property of physician Bodin, with trunk diameter of about 44 cm, the aircraft lost 1/3 of its left wing, climbed and underwent a half-roll, before a significant impact fragmentation in partially wooded terrain. The details of the last seconds of the flight remain hotly contested. Numerous alternative proposals exist as to the place where the wing was severed, the roll angle, the trajectory and its supposed disagreement with the data from flight recorders, esp. the early-warning TAWS system. However, the investigation of the last 5 seconds of flight utilizing aerodynamics and solid body mechanics, leads to the conclusions discussed in the presentation, leaving no doubt about the sequence of events. The loss of the left wingtip must have occurred on the Bodin's birch (with 5 m uncertainty). In case of a significantly later loss of the lift on the left wing, the final roll angle would not have reached 150 degrees found by the Investigative Committee of Aircraft Accidents, and the numerous trees along the path of the plane would not have been cut at the observed height or angle. Likewise, the position of the fuselage w.r.t. the ground at touchdown would have been different from the actual one. The latter conclusion was obtained by augmenting the previously existing so-called reduced degrees of freedom model by the author, with the fourth degree of freedom (yaw). The flight trajectory does not differ significantly from that computed previously. The yaw and the resultant magnetic heading deviation w.r.t. the ground track are of order 20 degrees of arc.

A strong bracket was found binding together the three principal sources of knowledge about the final moments of the flight: (i) the dynamical simulation of the airplane, (ii) recordings of the diverse parametric black boxes carried by PLF 101, as well as (iii) the distribution of trees and aircraft debris, in the form of the cockpit voice recording (CVR tape). In contrast with some previous interpretations and official analyses, the study of CVR revealed a series of events: the cutting of individual localized objects and extended woods along the computed trajectory, as well as the flight above terrain devoid of obstacles. With accuracy reaching

~0.03s in time and 2 m in the position on the map, it was possible to identify in CVR the moment cutting by the front fuselage of a tree group before the Bodin's birch, the collision with it, as well as other critical points of the trajectory. In contrast to the alternative theories, the flight path did pass through the alert points registered by the TAWS and FMS systems, and is consistent with them in time.

The versatile physical analysis of the finish of PLF 101 excludes explosion(s) and/or fragmentation of the aircraft in the air. Such events would produce a diametrically different, unobserved, trajectory of the aircraft and the distribution of its debris. They would also contradict laboratory analyses and the accounts given by witnesses.

**ML-XVI 2014**

**CO SYMULACJE DYNAMICZNE ŁAMANIA BRZOZY I LOTU  
KONCOWKI SKRZYDŁA MOWIA O PRZEBIEGU KATASTROFY  
TUPOLEWA PLF 101**

PAWEŁ ARTYMOWICZ

*Depts. of Physical Science, and Astronomy & Astrophysics, University of Toronto, Canada  
e-mail: pawel@utsc.utoronto.ca*

Półtora roku po katastrofie prezydenckiego tupolewa na podejściu do lotniska Siewiernyj w Smoleńsku w kwietniu 2010 r., pojawiły się obliczenia numeryczne przy użyciu programu LS-Dyna, które posłużyły do argumentacji, że udokumentowane w badaniach komisji państwowych zderzenie lewego skrzydła Tu-154M z pniem brzozy o średnicy ok. 40 cm, nie mogło zajść w rzeczywistości. Wyniki symulacji sugerowały, że brzoza jest łatwo niszczone przez skrzydło, które nie doznaje uszkodzeń strukturalnych. Obliczenia te były jednak błędne. Założenia metody MES były gwałcone, modelowane drewno sztucznie znikało, zaś skrzydło było błędnie modelowane jako 'pancerne' (niektóre blachy były wielokrotnie za grube, brakowało też rozdzielczości).

Moje oszacowania analityczne zaprzeczały symulacjom. Obecnie rozszerzyłem modelowanie do przypadku eksplícite zależnego od czasu i rozdzielonego przestrzennie. Korzystam z modeli LS-Dyna grupy dr. A. Morki z WAT (2013, w przygot.) w celu oszacowania siły działającej na pień i skrzydło. Realistyczne modele skrzydła, nie zawyżające wielokrotnie grubości blach, jak też lepsze modele materiałowe odnośnych materiałów, powodują, że skrzydło pęka pod wpływem całkowitej siły oscylującej przez kilkadziesiąt milisekund pomiędzy ~20 i ~30 ton. Te modele nie mówią z kolei nic o procesie łamania brzozy, która z założenia jest niedeformowalna ('pancerna'). Usuwa ten niedostatek moja symulacja, przebiegająca następująco.

Pień brzozy ulega najpierw nieznacznemu zgnieceniu poprzecznie do kierunku włókien. Proces ten ustaje z początkiem rwania blach kesonu skrzydła. Trwa natomiast nieprzerwanie rozpędzanie pnia przez siłę oddziaływania. Po 50 ms następuje oderwanie końcówki skrzydła i zanik siły działającej na pień. Jednak jego inercja powoduje, że pień nadal wygina się, osiągając w końcu krytyczną wartość naprężenia łamania MOR ~ 50 MPa na ekstremalnych włóknach pnia po stronie przeciwnej do uderzonej w okolicy miejsca zderzenia, jak i natychmiast po tym, także u podstawy pnia po stronie uderzonej. Brzoza uległa pęknięciom w obu

wskazanych rejonach. Stało się to na ułamek sekundy po urwaniu końcówki skrzydła bezpośrednio na brzozie. Siły aerodynamiczne miały niewielki udział w destrukcji skrzydła.

Urwana końcówka skrzydła jest w obliczeniach dynamicznych podrywana do góry i wprawiana w obrót. Spada w znacznej odległości od punktu oderwania, zgodnej z faktyczną odległością 110 m. To obala inny, niefizyczny, argument przeciw scenariuszowi wypadku opisanemu w raportach komisji (wg. błędnych obliczeń alternatywnych, końcówka miała spaść za ledwie ~10 m od pnia brzozy). Wskażę prawdopodobną przyczynę pomyłki.

**ML-XVI 2014**

**WHAT DO DYNAMICAL SIMULATIONS OF BIRCH DESTRUCTION  
AND A FLIGHT OF THE RUPTURED WING TELL US ABOUT THE  
SMOLENSK CATASTROPHE OF TUPOLEV PLF 101?**

PAWEŁ ARTYMOWICZ

*Physycal Sciences, and Astronomy & Astrophysics Depts., University of Toronto  
e-mail: pawel@utsc.utoronto.ca*

One and half years after the crash of the presidential Tupolev on approach to the S evernyi aerodrome in Smolensk in April 2010, the first numerical simulations using the LS-Dyna program appeared. They were intended as a counterproof to a fact well documented by the investigation committees, that the left wing of the Tu-154M collided with a trunk of a birch tree of about 40 cm diameter . The simulations suggested that the birch is easily destroyed by the wing, which does not suffer structural damage. These calculations were erroneous. The assumptions of the FEM method were violated, the modeled timber mysteriously disappeared, and the wing's aluminum was erroneously modeled as up to several times too thick. Inadequate resolution added to those problems.

My first analytical estimates contradicted the above models. They were based on the modulus of rupture (MOR) of live birch timber. I will present here more detailed models, which are explicitly spatially resolved and time-dependent. I use the recent results obtained with LS-Dyna by the group of Dr. A. Morka from MTU/WAT (in prep.). Their realistic wing models spanning the correct alloy thickness of TU-154M, as well as improved material models, result in the wing being torn apart by a total mutual interaction force that settles (oscillating) at 20 to 30 tons of force. Hower, these models do not tell us anything about the behavior of the tree trunk, which by assumption is indestructible and inflexible. My simulations resolve that issue, as follows.

The tree trunk first undergoes a mild sideways crushing, which stops as soon as the wing's structure starts to tear. Meanwhile, the trunk is constantly pushed by the wing, which causes bending deformation and stresses. After a time much longer than needed to seal the fate of the wing, the bending stresses exceed MOR  $\sim 50$  MPa in the extreme fibers (on the side opposite to the area hit by the wing, and on the side of the hit, at the bottom of the trunk). The trunk cracks in both of those places. It now becomes clear that this happened late, some time after the detachment of the windtip. The wing loses an uneven competition with

the massive trunk first, followed by the later breakage of the the tree. Aerodynamic forces are moderately helpful, but are not decisive for the wing breaking and detachment.

In aerodynamic simulations the wingtip starts rotating and is pushed upwards at first, then tumbles out to a distance that may be comparable to 100 m, which is the true distance in the Smolensk crash. This disproves another argument directed against the scenario of collision with the tree documented by the accident investigation committees. According to the unphysical alternative calculations, the wingtip cannot get more than ~10 m away from the tree.