

MICHAŁ KAMIŃSKI<sup>1</sup>, WOJCIECH POSPOLITA<sup>2</sup>, MACIEJ CHOLEWIŃSKI<sup>3</sup>,  
AGNIESZKA ŁAGOCKA<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Zakład Niskoemisyjnych Źródeł Energii i Gospodarki Odpadami*

*Instytut Inżynierii Rolniczej*

*Wydział Przyrodniczo-Technologiczny*

*Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu*

*C. K. Norwida 25, 50-375 Wrocław*

<sup>2</sup>*Zakład Mechaniki i Systemów Energetycznych*

*Wydział Mechaniczno-Energetyczny*

*Politechnika Wroclawska*

*Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław*

<sup>3</sup>*Katedra Technologii Energetycznych, Turbin i Modelowania Procesów Ciepłno-Przepływowych*

*Wydział Mechaniczno-Energetyczny*

*Politechnika Wroclawska*

*Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław*

<sup>4</sup>*Katedra Kształtowania Agroekosystemów i Terenów Zieleni*

*Wydział Przyrodniczo-Technologiczny*

*Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu*

*C. K. Norwida 25, 50-375 Wrocław*

*E-mail: maciej.cholewinski@pwr.edu.pl*

## EMISJA ZANIECZYSZCZEŃ Z SEKTORA TRANSPORTU LOTNICZEGO I JEJ WPŁYW NA ZDROWIE CZŁOWIEKA

### WSTĘP

Ostatnie 50 lat to okres szybkiego rozwoju transportu lotniczego, który stał się istotnym elementem postępującej globalizacji. W 2012 r. wykonano łącznie 79 mln lotów, przewożąc ok. 5,7 mld pasażerów między 1598 lotniskami w 159 krajach (ACI 2013). Obecnie, przeloty pasażerskie stanowią 10% całego światowego ruchu pasażerskiego, a usługi transportowe za pośrednictwem samolotów pokrywają 35% popytu na przewóz towarów (SCHÄFER i WAITZ 2014). Międzynarodowy przemysł lotniczy zapewnia bezpośrednio 8,4 mln miejsc pracy. Prognozuje się, że liczba lotów na świecie będzie wzrastać o około 5% rocznie, co pozwoli na jej podwojenie w ciągu 15 lat, tj. do 2030 r. (ICAO 2013). Szybki rozwój sektora lotniczego, wykorzystującego maszyny napędzane silnikami spalinowymi i turbinowymi spalającymi paliwa płynne, wywołuje negatywne

zmiany w środowisku naturalnym. Pierwsze badania naukowe w tym zakresie rozpoczęto dopiero pod koniec lat 80. XX w., jednak nie podjęto stosownych kroków prawnych, które mogłyby temu przeciwdziałać. Przez wiele lat porty lotnicze i samoloty funkcjonowały bez większych ograniczeń, mimo szkodliwego oddziaływania na środowisko poprzez wywołany hałas i nadmierną emisję toksycznych składników w spalinach. Zanieczyszczenia emitowane przez lotnictwo pośrednio lub bezpośrednio oddziałują na zdrowie człowieka i środowisko, a także prowadzą do strat w budownictwie (głównie na skutek korozji konstrukcji metalowych i betonowych) (JAROSIŃSKI 1996, MASIOL i HARRISON 2014). Większość ujemnych skutków jest odczuwana w bliskim otoczeniu lotnisk, jednak ruch lotniczy ma wpływ także na zmiany klimatyczne w skali regionalnej i globalnej. Celem pracy jest przedstawienie silników stosowanych w lotnictwie oraz procesu spalania paliwa, ro-

dzajów zanieczyszczeń emitowanych przez samoloty, a także oddziaływania sektora lotniczego na środowisko i zmiany klimatyczne.

### SILNIKI STOSOWANE W LOTNICTWIE

O wpływie samolotów na środowisko naturalne w dużym stopniu decyduje konstrukcja silników (wpływająca m.in. na jakość spalania paliwa) i aerodynamika kadłuba, od której zależy intensywność generowanego hałasu (ŁAPUCHA 2004). Z jednej strony, ważne jest jak najmniejsze zużycie paliwa przy możliwie niskiej emisji zanieczyszczeń, a z drugiej, niezawodność lotniczych układów napędowych, podatność na zmiany obciążeń, lekka konstrukcja i odpowiednia odporność na warunki otoczenia. Niekiedy ważniejsze od wymagań ekologicznych jest bezpieczeństwo samolotu i konkurencyjność rynkowa.

Do najważniejszych typów silników stosowanych w lotnictwie należą silniki turbinowe: turbowentylatorowe i turbośmigłowe, turbowalowe, a w mniejszych jednostkach silniki tłokowe wewnętrznego spalania (BALICKI i współaut. 2009). Wszystkie te konstrukcje stanowią układy, w których z energii chemicznej spalanej paliwa uzyskuje się energię mechaniczną wykorzystywaną do napędu maszyny. Towarzyszy temu uwalnianie wielu związków zawartych w spalinach. Większość współczesnych samolotów pasażerskich i dużych jednostek transportowych jest wyposażona w silniki turbowentylatorowe. Pierwsze egzemplarze były stosowane podczas II Wojny Światowej (DONALD 2004). Zasada ich działania polega na wytworzeniu siły ciągu zdolnej do pokonania sił oporu powietrza i grawitacji. Siła ciągu powstaje dzięki nadaniu powietrzu i spalinom odpowiednio dużej prędkości. Napędy turbowentylatorowe wyposażone są w turbinę, dyszę i sprężarkę, której rolą jest zwiększenie ciśnienia pobieranego powietrza. Przepływające przez silnik, wstępnie sprężone powietrze, rozdzielane jest na dwa strumienie: większy z nich opływa część silnika, chłodząc go i stając się głównym źródłem siły ciągu. Mniejszy płynie do wewnętrznej części silnika, gdzie jest dalej sprężany w wysokociśnieniowej części kompresora i ogrzewany (KAWALEC i współaut. 2010). Gorące powietrze, o ciśnieniu prawie 250 razy wyższym od atmosferycznego, jest kierowane do komory spalania, gdzie wraz z rozpylanym paliwem tworzy mieszaninę paliwowo-powietrzną. Powstające gorące spaliny wprowadzane są do turbiny gazowej napędzającej kompresor, po czym trafiają do dyszy, gdzie zwiększają swoją prędkość. Powstający efekt odrzutu wytwarza siłę ciągu (ŁAPUCHA 2004).

Silniki turbowentylatorowe wykorzystywane są w największych modelach samolotów cywilnych oraz większości jednostek wojskowych i osiągają siłę ciągu o wartości nawet 25.000 kG (245.000 kN).

Silniki turbośmigłowe, lżejsze w porównaniu do turbowentylatorowych i zasilane tańszym paliwem, stosowane są w mniejszych samolotach do przewozów regionalnych (JEŻ 2008). Nie pozwalają one na osiąganie zbyt dużych prędkości przelotowych, jednak są bardziej wydajne przy niskich prędkościach (BALICKI i współaut. 2009). Zasada ich działania jest podobna do silników turbowentylatorowych z tą różnicą, że turbina napędza sprężarkę i śmigło, które wytwarza siłę ciągu (KAWALEC i współaut. 2010). Nowoczesne silniki turbośmigłowe mogą osiągać moc 12.000-15.000 kW, a skład spalin jest podobny do spalin silników turbowentylatorowych (JEŻ 2010). Silniki turbowalowe, stosowane w helikopterach, mają dodatkowo wał obrotowy, który poprzez przekładnię napędza śmigło poziome (WITKOWSKI 2003). Rzadziej stosowane obecnie silniki tłokowe wewnętrznego spalania działają podobnie jak silniki samochodowe. Ich konstrukcja zakładała minimalny stosunek masy własnej do osiągniętej mocy i były rozpowszechnione po II Wojnie Światowej (BALICKI i współaut. 2009).

### WPLYW TRANSPORTU LOTNICZEGO NA JAKOŚĆ POWIETRZA ATMOSFERYCZNEGO

Oddziaływanie transportu lotniczego na otoczenie analizowane na poziomie lokalnym jest związane głównie z hałasem generowanym przez startujące i lądujące samoloty. Na poziomie regionalnym szkodliwy wpływ lotnictwa wiąże się z zanieczyszczeniem powietrza reaktywnymi związkami powstającymi blisko miejsca ich wyemitowania. W skali globalnej, wskutek wielkiej liczby przelotów lotniczych, następują zmiany klimatu całej planety związane z migracją zanieczyszczeń związkami mało reaktywnymi wprowadzanymi do otoczenia na wysokościach przelotowych, czyli na granicy troposfery i stratosfery (JEŻ 2009, SCHÄFER i WAITZ 2014).

Emisja zanieczyszczeń lotniczych jest wynikiem spalania paliwa wykorzystywanego do napędu maszyny, a ich poziom zależy od jakości paliwa i procesu spalania. Podstawowym paliwem stosowanym we współczesnych cywilnych statkach powietrznych jest nafta lotnicza, kerozyna (KAWALEC i współaut. 2010). Jest ona tanim produktem destylacji ropy naftowej, niewymagającym uszlachetniania, dzięki czemu zyskała dużą popularność w lotnictwie (KORDYLEWSKI 2008). Paliwo to posiada niższą od pozosta-

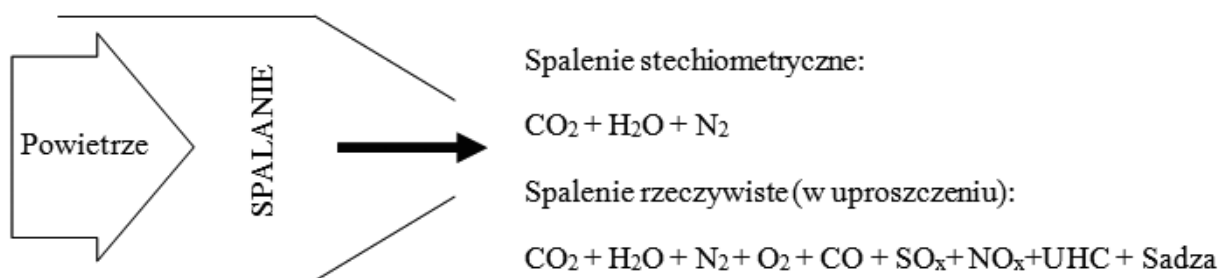
łych paliw temperaturę krzepnięcia (poniżej minus 50°C) oraz właściwości ułatwiające start silnika ze stanu zimnego, dzięki czemu jest bezpieczne w eksploatacji w klimacie zimnym (MAJOCH 2012). Zawiera ono dodatki poprawiające parametry eksploatacyjne, zapobiegające korozji elementów silnika i obniżając przewodność elektryczną. Skład chemiczny spalin jest podobny we wszystkich opisanych silnikach. Typowe gazy odlotowe z silników lotniczych zawierają 4 składniki: azot ( $N_2$ ), tlen ( $O_2$ ), dwutlenek węgla ( $CO_2$ ) i parę wodną (WAHNER i współaut. 1995). Ponadto, niewielką część objętości spalin stanowi mieszanina tlenku węgla (CO) i niespalonych węglowodorów (ang. unburned hydrocarbons, UHC). Wysoka temperatura podczas spalania paliwa sprzyja utlenianiu azotu zawartego w powietrzu według mechanizmu opisanego przez Zeldowicza, a także szeregu reakcjom z pozostałymi składnikami spalin, w tym z rodnikami węglowodorowymi (KORDYLEWSKI 2008). W efekcie powstają tlenki azotu ( $N_2O$ , NO,  $NO_2$ ; oznaczane w dalszej części jako  $N_yO_x$ ), które przyczyniają się do powstawania ozonu i smogu fotochemicznego. Emisję  $N_yO_x$  oraz innych zanieczyszczeń można ograniczyć, utrzymując stechiometryczne warunki spalania (Ryc. 1) w odpowiednio niskiej temperaturze, poniżej 800°C. Jest to jednak niemożliwe ze względu na częste zmiany obciążenia silnika, zwłaszcza w początkowej i końcowej fazie lotu oraz zapewnienie wysokiej temperatury koniecznej do spalania w sposób stabilny.

Paliwo lotnicze zawiera ponadto śladowe ilości siarki, metali ciężkich i substancji mineralnych, które w wyniku spalania tworzą wprowadzane do otoczenia tlenki siarki oraz cząsteczki sadzy i pyłów. Tlenki siarki zawarte w spalinach po przedostaniu się do atmosfery ulegają utlenieniu do stabilnego tlenku  $SO_3$ , a następnie łączą się z kroplami wody, tworząc wodny roztwór  $H_2SO_4$ , będący składnikiem tzw. kwaśnych deszczów. Sadza i popioły lotne tworzą aerozole zdolne do sorbowania substancji kancerogennych. Dlatego normy środowiskowe powinny ogra-

niczać udział tych śladowych substancji także w paliwach lotniczych.

Najwięcej zanieczyszczeń do środowiska wprowadzają jednostki napędowe samolotów pasażerskich i transportowych mające największą moc i zużywające najwięcej paliwa, proporcjonalnie do wartości wytwarzanej siły ciągu (ANDERSON i współaut. 2005). Głównym miejscem wprowadzania związków toksycznych są górne warstwy. Najwięcej zanieczyszczeń wprowadzanych jest na wysokościach 8-12 km n.p.m., na których odbywają się loty długodystansowe, ponieważ opory powietrza są tam najmniejsze (STEVENSON i współaut. 2004). Jedynie 5-10% światowego zużycia paliwa lotniczego następuje na wysokościach nieprzekraczających 1 km (KIM i współaut. 2007). W wyniku wzrastającej zawartości  $N_yO_x$  w atmosferze, spowodowanej emisją tych tlenków przez silniki lotnicze, wzrasta stężenie ozonu troposferycznego  $O_3$ , wywołującego dysfunkcje układu oddechowego ludzi i zakłócenia w fotosyntezie roślin (BARRET i współaut. 2010).

Szczególnie niekorzystna sytuacja i wzmożona emisja zanieczyszczeń ma miejsce, gdy silniki spalinowe pracują w stanach nieustalonych. W przypadku silników lotniczych dotyczy to głównie strefy wokół lotniska i zależy od procedur startu i lądowania. W trakcie startu silnik zwykle przez około 40 sekund obciążony jest w 100%, natomiast przy lądowaniu przez 4 min eksploatowany jest w 30% obciążenia nominalnego (ICAO 2013). Podobna sytuacja ma miejsce w trakcie realizacji procedury GPR (ang. ground running procedure), kiedy to silnik poddawany jest najwyższym obciążeniom w celu sprawdzenia m.in. pracy zaworów i szczelności instalacji olejowej i paliwowej. Według MAZAHERI i współaut. (2011) procedura GPR na londyńskim lotnisku Heathrow odpowiada za emisję 15,6 Mg  $N_yO_x$  rocznie. Stąd też wysoki poziom emisji zanieczyszczeń dotyczy nie tylko wyższych stref troposfery, ale również samych lotnisk i okolicznych mieszkańców. Składnikami szkodliwych emisji są także pyły ze ścierania nawierzchni lotniska



Ryc. 1. Schemat spalania stechiometrycznego i rzeczywistego.



oraz pozostałości z rozpylonych powierzchni opon i tarcz hamulcowych samolotów w trakcie kołowania. Ubytek masy opon samolotu w czasie jednego tylko lądowania może wynieść nawet 0,8 kg (ICAO 2011) i zależy jest tak od masy samolotu (generowanej siły nacisku na podłoże), jak i materiału, z którego wykonano opony (chropowatości oraz odporności na ścieranie). W skład powstałego pyłu wchodzi polimery i cząstki metali takich jak: cynk, molibden, antymon, miedź, bar (MORRIS 2006). Wyniki badań przeprowadzonych na innym londyńskim lotnisku (Gatwick) wskazują na emisję pyłów  $PM_{10}$  (ang. particulate matter; pyły zawieszone o ziarnach o średnicach poniżej  $10 \mu m$ ) tylko ze startych opon i nawierzchni lotniska w ilości 4,5 Mg na rok (BAA 2006).

Do zanieczyszczenia powietrza przyczynia się także korozja elementów konstrukcyjnych samolotów, które są najczęściej wykonane z aluminium, posiadającego mikrostrukturę podatną na wzmożoną korozję wżerową. Przy zastosowaniu technologii skaningowego mikroskopu elektronowego wykazano podwyższoną zawartość cząstek aluminium w powietrzu wokół lotniska El Prat w Barcelonie (AMATO i współaut. 2010).

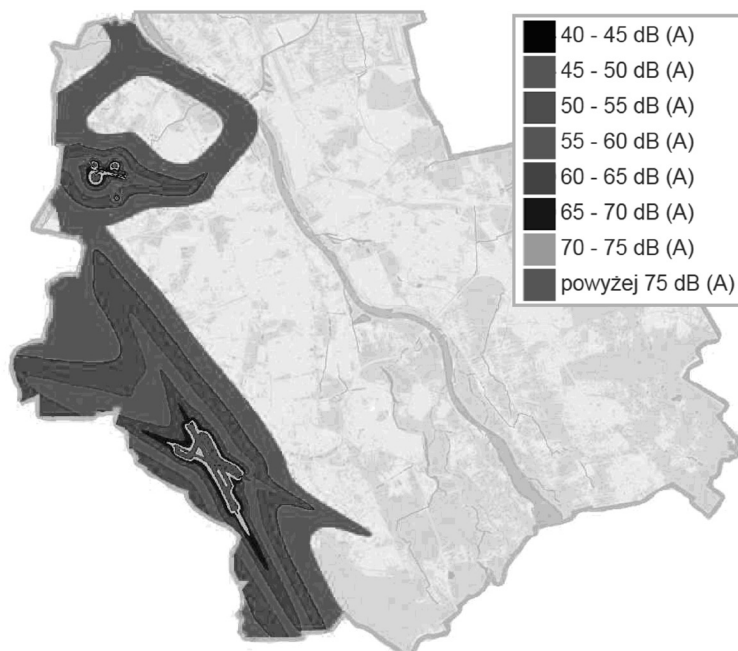
Do szkodliwych związków emitowanych przez silniki lotnicze należą frakcje oleju smarnego wydostającego się poprzez nie szczelności. Oleje lotnicze są zazwyczaj mieszanką syntetycznych estrów ze specjalistycznymi dodatkami; niektóre są toksycz-

ne dla ludzi. Niestety, pomimo postępującej modernizacji konstrukcji samolotów można je wykryć (w formie par lub kropel) zarówno w otoczeniu lotnisk, jak i wewnątrz samolotu (SOLBU i współaut. 2010).

Porty lotnicze stanowią ważne centra komunikacyjne i transportowe, w których także panuje wzmożony ruch różnorodnych pojazdów. Poziom emisji z tych źródeł jest wysoki i może osiągnąć nawet 60% całkowitej emisji zanieczyszczeń z obszaru lotniska i jego otoczenia (NAMBISAN i współaut. 2007).

## GENERACJA HAŁASU PRZEZ SAMOLOTY

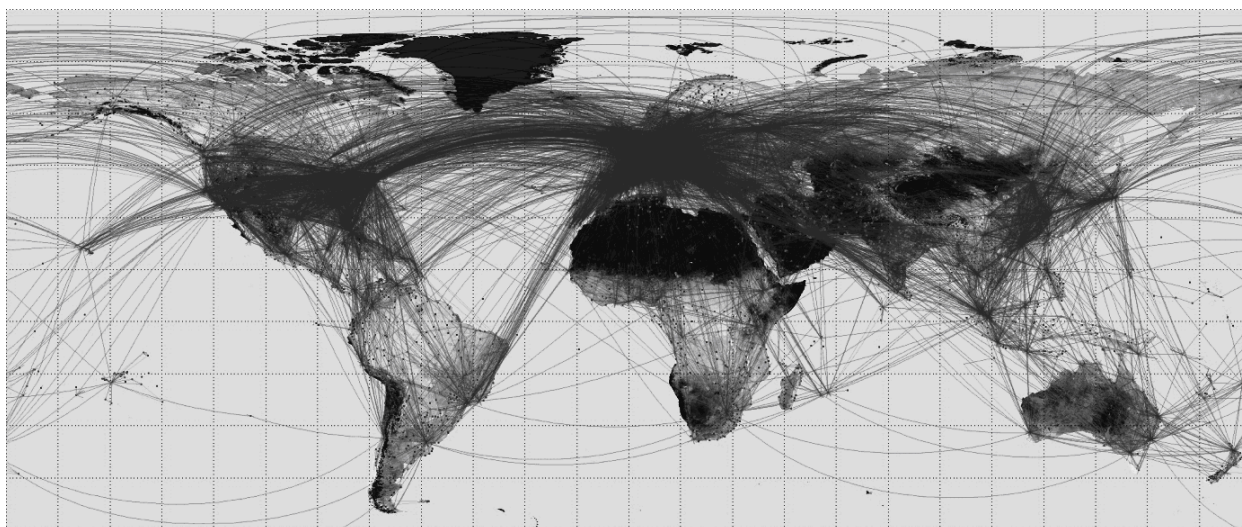
Sektor lotniczy jest źródłem hałasu, który w myśl obowiązujących aktów prawnych traktowany jest także jako zanieczyszczenie środowiska (JEŻ 2010). Podobnie jak zanieczyszczenia chemiczne, przekroczenie pewnych dopuszczalnych norm natężenia dźwięku negatywnie oddziałuje na otoczenie i jego mieszkańców. Startującemu samolotowi towarzyszy głośność ok. 120 dB, zbliżona do granicy bólu (130 dB). Na rycinie 2 przedstawiono mapę poziomu głośności w Warszawie i zaznaczono dwa obszary ponadnormatywnego hałasu; większy z nich obejmuje lotnisko im. F. Chopina (średniej wielkości europejski port lotniczy obsługujący obecnie ponad 11 mln pasażerów rocznie), a mniejszy to strefa oddziaływania portu Warszawa-Babice. Zamieszczone na rycinie 2 wartości



Ryc. 2. Poziom głośności w Warszawie pochodzenia lotniczego (wg [mapaakustyczna.um.warszawa.pl](http://mapaakustyczna.um.warszawa.pl)).

odnoszą się do wskaźnika  $L_{DWN}$ , stanowiącego równoważny poziom hałasu w okresie dziennowieczno-nocnym. Wskaźnik ten jest powszechnie stosowany w ocenie wpływu hałasu na otoczenie (GIERASIMIUK i MOTYLWICZ 2014).

Hałas pochodzenia lotniczego jest trudny do kontroli. Nie można bowiem, jak ma to miejsce w przypadku transportu drogowego czy kolejowego, ograniczać go za pomocą barier akustycznych. Co więcej, budowa lotnisk na obrzeżach miast również nie zawsze jest skutecznym rozwiązaniem, gdyż ciągły ich rozwój przyczynia się do powstawania stref mieszkalnych w pobliżu portów lotniczych. Czynione są próby ograniczania emisji hałasu poprzez nakazy zmniejszenia wartości ciągu silników lotniczych w trakcie przelotów nad strefami zamieszkania i wprowadzanie stref zakazu lotów (np. nad parkami narodo-



Ryc. 3. Schemat przebiegu światowych tras lotniczych (bez obszaru Antarktydy) (wg Jpatokal, wikimedia.org, licencja CC).

wymi), jednak osiągany w ten sposób efekt środowiskowy nie równoważy wciąż rosnącej liczby lotów.

Hałas negatywnie wpływa na zdrowie ludzi mieszkających w pobliżu lotnisk. Jego oddziaływanie na zdrowie człowieka można podzielić na skutki słuchowe i pozasłuchowe. Do skutków słuchowych zalicza się postępujący niedosłuch odbiorczy związany z uszkodzeniem ucha wewnętrznego, natomiast do pozasłuchowych klasyfikuje się przede wszystkim choroby układu krążenia (m.in. nadciśnienie, choroba wieńcowa) (PAWLAS 2015). Długotrwałe narażenie mieszkańców na permanentny hałas prowadzi do powstawania nerwic, zaburzeń snu i efektywnej pracy umysłowej. Wykazano, iż ludność mieszkająca w pobliżu lotnisk ponosi konsekwencje zdrowotne przeliczane na kilkaset USD *per capita* w ciągu roku (WOLFE i współaut. 2014).

#### WPLYW TRANSPORTU LOTNICZEGO NA GLOBALNE ZMIANY KLIMATU

Obserwowany od połowy XX w. szybki rozwój sektora lotniczego przyczynia się do negatywnych zmian klimatu. Według danych zaprezentowanych przez HARRISON i współaut. (2015), transport lotniczy generuje ok. 2% światowej emisji gazów cieplarnianych. Przodują w tym USA, Europa Zachodnia i Wschodnia Azja (KIM i współaut. 2007).

Dane te znajdują swoje potwierdzenie na mapie światowych połączeń lotniczych (Ryc. 3) oraz globalnym zużyciu paliwa na przeloty do różnych państw świata w ciągu roku. STETTLER i współaut. (2011) wykazali, iż ruch lotniczy w stronę Stanów Zjednoczonych Ameryki Północnej zużywa

rocznie 59,1 mln ton paliwa lotniczego. Na dalszych miejscach znajdują się Japonia (9,7 mln ton), Wielka Brytania (9,4 mln ton) i Chiny (8,5 mln ton). Połączenia do Niemiec i Francji zużywały odpowiednio 6,7 mln ton i 5,4 mln ton rocznie. Silna dysproporcja w przypadku spalania paliwa lotniczego w skali świata sprawia, iż to właśnie we wspomnianych regionach należy spodziewać się wzmożonej depozycji zanieczyszczeń lotniczych o charakterze lokalnym lub regionalnym (takich jak tlenki kwasowe).

Do sektora transportu, poza lotnictwem cywilnym i transportowym, należą także podsektory pojazdów drogowych, kolejowych i morskich. Każdy z tych podsektorów, ze względu na różnice w technice zasilania oraz intensywności wykorzystania, odpowiedzialny jest w różnym stopniu za degradację środowiska. Najwięcej CO<sub>2</sub>, bo aż 4200 mln ton rocznie, wprowadza do otoczenia transport drogowy. Transport lotniczy to 675 mln ton, sektor wodny (uwzględniający żeglugę morską i lądową) to 663 mln ton, a transport kolejowy (lokomotywy spalinowe i elektryczne, włączając procesy generacji elektryczności do zasilania trakcji) 124 mln ton (ACI 2013). W przypadku tlenków azotu, lotnictwo wprowadza do środowiska jedynie 5,7% z ogółem 49 mln ton, a tlenków siarki zaledwie 0,8% z całkowitej ilości 11,3 mln ton. Znacznie większy udział w emisji tlenków azotu ma transport drogowy (59,6%) i wodny (31,6%), a tlenków siarki: wodny (ponad 77%), drogowy (16,8%) i kolejowy (5,3%) (ACI 2013). Poza tymi zanieczyszczeniami lotnictwo emituje także pyły respirabilne, PM<sub>10</sub> (cząstki mniejsze niż 10 μm) i PM<sub>2,5</sub> (cząstki mniejsze niż 2,5 μm),



które adsorbują na swojej powierzchni liczne związki kancerogenne (m.in. wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne), oraz metale ciężkie, akumulujące się w ludzkim organizmie. Szczególnie niebezpieczne są bardzo małe cząstki  $PM_{2.5}$ , które docierają do pęcherzyków płucnych i do krwi, wywołując choroby alergiczne, ataki astmy i nowotwory (WHO 2006). Wykazano, że z powodu wysokich wartości stężeń  $PM_{2.5}$  oraz ozonu troposferycznego, emitowanych przez lotniska w obszarach zabudowanych, każdego roku na świecie przedwcześnie umiera blisko 5000 osób mieszkających w promieniu 20 km od lotniska, a ponadnormatywne stężenia obu toksycznych substancji powodują globalne straty szacowane na 21 mld dolarów rocznie (SCHÄFER i WAITZ 2014).

### PODSUMOWANIE

Transport lotniczy przyczynia się do zanieczyszczania środowiska i zmian klimatu, a także stał się pośrednio lub bezpośrednio odpowiedzialny za pogorszenia zdrowotności mieszkańców terenów sąsiadujących z portami lotniczymi. Lokalne zagrożenia środowiskowe i zdrowotne są związane z emisją toksycznych spalin, generowaniem uciążliwego hałasu oraz wytwarzaniem szkodliwych pyłów  $PM_{10}$  i  $PM_{2.5}$ . Udział transportu lotniczego w globalnej zmianie klimatu wiąże się głównie z emisją dwutlenku węgla, tlenków azotu oraz pary wodnej w górnych warstwach troposfery i na granicy stratosfery. Obszary te są szczególnie wrażliwe na wszelkie modyfikacje natury fizyko-chemicznej, a jednocześnie bardzo ważne dla prawidłowego funkcjonowania biosfery. Do środków zaradczych należy zaliczyć wprowadzanie zaostrożonych norm środowiskowych związanych z uwolnieniami szkodliwych produktów i toksycznych zanieczyszczeń. Duże nadzieje związane są z podatkiem od emisji  $CO_2$ , zaostrożeniem norm emisji dla tlenków azotu i  $SO_2$ , wprowadzaniem nowych paliw (np. czystych paliw lotniczych, biopaliw), optymalizacją tras przelotów, instalowaniem bardziej sprawnych silników i zmianami konstrukcyjnych w budowie kadłubów samolotów.

#### Streszczenie

Szybki rozwój lotniczego transportu pasażerskiego oraz towarowego, jaki dokonał się w ostatnich 50 latach, nie pozostał bez wpływu na środowisko naturalne. Prowadzone w tym zakresie badania wykazały negatywne oddziaływanie, które można rozpatrywać zarówno w skali lokalnej, tj. w bliskim sąsiedztwie lotnisk, jak i w skali globalnej z uwzględnieniem wywołanych zmian klimatycznych i zanieczyszczenia powietrza. W artykule przedstawiono stan wiedzy na temat skutków oddziaływania transportu lotniczego na zdrowie ludzi.

### LITERATURA

- ACI, 2013. *World airport traffic report*. Media release Airports Council International. Montreal.
- AMATO F., MORENO T., PANDOLFI M., QUEROL X., ALASTUEY A., DELGADO, A., PEDRERO M., COTS N., 2010. *Concentrations, sources and geochemistry of airborne particulate matter at a major European airport*. J. Environ. Monit. 12, 854-862.
- ANDERSON B. E., BRANHAM H.-S., HUDGINS C. H., PLANT J. V., BALLENTIN J. O., MILLER T. M., VIGGIAN A. A., BLAKE D. R., BOUDRIES H., CANAGARATNA M., MIAKE-LYE R. C., ONASCH T., WORMHOUDT J., WORSNOP D., BRUNKE K. E., CULLER S., PENKO P., SANDERS T., HAN H.-S., LEE P., PUI D. Y. H., THORNHILL K. L., WINSTEAD E. L., 2005. *Experiment to characterize aircraft volatile aerosol and trace-species emissions (EXCAVATE)*. NASA/TM-2005-213783. National Aeronautics and Space Administration, Hampton, VA.
- BAA, 2006. *Gatwick 2010 baseline emission inventory*. British Airports Authority.
- BALICKI W., CHACHURSKI R., GŁOWACKI P., GODZIMIRSKI J., KOZAKIEWICZ A., PAGOWSKI Z., SZCZECIŃSKI J., SZCZECIŃSKI S., 2009. *Lotnicze zespoły napędowe. Część 1*. WAT, Warszawa.
- BARRET S. R. H., BRITTER R. E. WAITZ A. I., 2010. *Aviation and climate Global mortality attributable to aircraft cruise emissions*. Environ. Sci. Technol. 44, 7736-7742.
- DONALD D., 2004. *Wielka encyklopedia samolotów*. Dom Wydawniczy Bellona, Warszawa.
- GIERASIMIUK P., MOTYLEWICZ M., 2014. *Hałas w otoczeniu dróg i ulic – problemy oceny i działania ochronne*. [W:] *Inżynieria Środowiska – Młodym Okiem, t. VII: Uwarunkowania sanitarno – inżynieryjne*. SKOCZKO I., PIEKUTIN J., ZARZECKA A. (red.). Politechnika Białostocka, PZIITS, Białystok, 59-93.
- HARRISON M. R., MASIOŁ M., VARDOLAKIS S., 2015. *Civil aviation, air pollution and human health*. Environm. Res. Lett. 10, 14-20.
- ICAO, 2011. *Airport Air Quality Manual*. International Civil Aviation Organization, Montreal.
- ICAO, 2013. *Annual Report of the Council 2012 International Civil Aviation Organization*. Montreal.
- JAROSIŃSKI J., 1996. *Techniki czystego spalania*. Wyd. Nauk.-Techn. Warszawa.
- JEŻ M., 2008. *Silniki spalinowe: zasady działania i zastosowanie*. Wyd. Nauk. Inst. Lotn. Warszawa.
- JEŻ M., 2009. *Transport lotniczy a zrównoważony rozwój*. Wyd. Nauk. Inst. Lotn. Warszawa.
- JEŻ M., 2010. *Ekologiczne problemy portu lotniczego*. Prace Inst. Lotn. 206, 59-71.
- KAWALEC K., BALICKI W., CHACHURSKI R., GŁOWACKI P., GODZIMSKI J., KOZAKIEWICZ A., PAGOWSKI Z., ROWIŃSKI A., SZCZECIŃSKI J., SZCZECIŃSKI S., 2010. *Lotnicze silniki turbinowe: konstrukcja - eksploatacja - diagnostyka. Część 1*. Wyd. Nauk. Inst. Lotn., Warszawa.
- KIM B. Y., FLEMING G. G., LEE J. J., WAITZ I. A., CLARKE J.-P., BALASUBRAMANIAN S., MALWITZ A., KLIMA K., LOCKE M., HOLSCLAW C. A., MAURICE L. Q., GUPTA M. L., 2007. *System for assessing Aviation's Global Emissions (SAGE). Part 1: model description and inventory results*. Transp. Res. D 12, 325-346.
- KORDYLEWSKI W., 2008. *Spalanie i paliwa*. Oficyna Wyd. Polit. Wroc., Wrocław.
- ŁAPUCHA R., 2004. *Komory spalania silników turbinowo-odrzutowych: procesy, obliczenia, badania*. Wyd. Nauk. Inst. Lotn. Warszawa.

- MAJOCH A., 2012. *Modelowanie zmian charakterystyki eksploatacyjnej paliw lotniczych podczas długotrwałego magazynowania*. Prace Nauk. Inst. Nafty i Gazu 186, 2353-2718.
- MASJOL M. R., HARRISON M., 2014. *Aircraft engine exhaust emissions and other airport-related contributions to ambient air pollution: A review*. *Atm. Environ.* 95, 409-455.
- MAZAHERI M., JOHNSON G. R., MORAWSKA L., 2011. *An inventory of particle and gaseous emissions from large aircraft thrust engine operations at an airport*. *Atm. Environ.* 45, 3500-3507.
- MORRIS K., 2006. *An estimation of the tyre material erosion from measurements of aircraft*. [W:] *British Airways Environmental Affairs, British Airways Technical Documents Relating to the Aircraft Operations Supporting the Project for the Sustainable Development of Heathrow, Document 7, EJT/KMM/1131/14.18*. British Airways, London.
- NAMBISAN S., KAJKOWSKI J., MENON R., 2007. *A preliminary survey of ground service equipment running times and its implications for air quality estimates at airports*. [W:] *The 2020 Vision of Air Transportation*. NAMBISAN S. (red.). Am. Soc. Civil Eng., San Francisco, CA, 144-152.
- PAWLAS K., 2015. *Hałas jako czynnik zanieczyszczający środowisko – aspekty medyczne*. *Med. Środow.* 18/4, 49-56.
- SCHÄFER W. A., WAITZ A. I., 2014. *Air transportation and environment*. *Transp. Policy* 34, 1-4.
- SOLBU K., DAAE H.L., THORUD S., ELLINGSEN D. G., LUNDANES E., MOLANDER P., 2010. *Exposure to airborne organophosphates originating from hydraulic and turbine oils among aviation technicians and loaders*. *J. Environ. Monit.* 12, 2259-2268.
- STETTLER M. E. J., EASTHAM S., BARRETT S. R. H., 2011. *Air quality and public health impacts of UK airports. Part I: emissions*. *Atm. Environ.* 45, 5415-5424.
- STEVENSON D. S., DOHERTY R. M., SANDERSON M. G., COLLINS W. J., JOHNSON C. E., DERWENT R. G., 2004. *Radiative forcing from aircraft NO<sub>x</sub> emissions: mechanism and seasonal dependence*. *J. Geophys. Res.* 109, D17307.
- WAHNER A., GELLER M. A., ARNOLD F., BRUNE W. H., CAROLLE D. A., DOUGLASS A. R., JOHNSON C., LISTER D. H., PYLE J. A., RAMAROSON R., RIND D., ROHRER F., SCHUMANN U., THOMPSON A. M., 1995. *Subsonic and supersonic aircraft emissions*. [W:] *Scientific Assessment of Ozone Depletion. Global Ozone Research and Monitoring Project e Report No. 37. Chapter 11*. WMO, UNEP, NOAA, NASA, Geneva.
- WHO, 2006. *Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Global update 2005. Summary of risk assessment*. World Health Organization <http://www.who.int/en>.
- WITKOWSKI R., 2003. *Wprowadzenie do wiedzy o śmigłowcach*. Wyd. Nauk. Inst. Lotn. Warszawa.
- WOLFE J. P., STEVE H. L. Y., GIDEON L., ASHOK A., BERRET S. R. H., WAITZ A. I., 2014. *Near-airport distribution of the environmental costs of aviation*. *Transp. Policy* 34, 102-108.

**KOSMOS Vol. 65, 4, 487-493, 2016**

MICHAŁ KAMIŃSKI<sup>1</sup>, WOJCIECH POSPOLITA<sup>2</sup>, MACIEJ CHOLEWIŃSKI<sup>3</sup>, AGNIESZKA ŁAGOCKA<sup>4</sup>

<sup>1</sup>The Department of a Low Emission Energy Sources and Waste Management, The Institute of Agricultural Engineering, The Faculty of Life Sciences and Technology, Wrocław University of Environmental and Life Sciences, C. K. Norwida 25, 50-375 Wrocław, <sup>2</sup>The Department of Mechanical Engineering and Power Systems, The Faculty of Mechanical and Power Engineering, Wrocław University of Science and Technology, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, <sup>3</sup>The Chair of Energy Technologies, Turbines and Modelling of Thermal and Fluid Flow Processes, The Faculty of Mechanical and Power Engineering, Wrocław University of Science and Technology, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, <sup>4</sup>Department of Agroecosystems and Green Areas Management, The Institute of Agricultural Engineering, The Faculty of Life Sciences and Technology, Wrocław University of Environmental and Life Sciences, C. K. Norwida 25, 50-375 Wrocław, E-mail: maciej.cholewinski@pwr.edu.pl

POLLUTANTS EMISSION FROM AIRCRAFT ENGINES AND ITS IMPACT ON HUMAN HEALTH

Summary

The rapid development of passengers and cargo air transport, that took place over the last 50 years, had a considerable impact on the environment. Surveys and research conducted in recent years identified several negative effects closely linked to air transport activities, both in local (noise in the proximity of the airports) and global scale (including climate changes and the emissions of the different air pollutants). In the article the impact of the airports and aircrafts on the human health are summarized and discussed.