

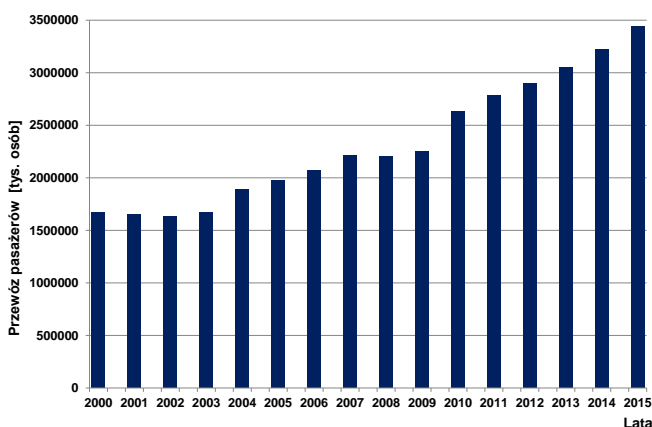
Remigiusz JASIŃSKI, Jacek PIELECHA, Jarosław MARKOWSKI, Paweł BENEDICT

ZEWNĘTRZNE KOSZTY ŚRODOWISKOWE DZIAŁALNOŚCI TRANSPORTU LOTNICZEGO

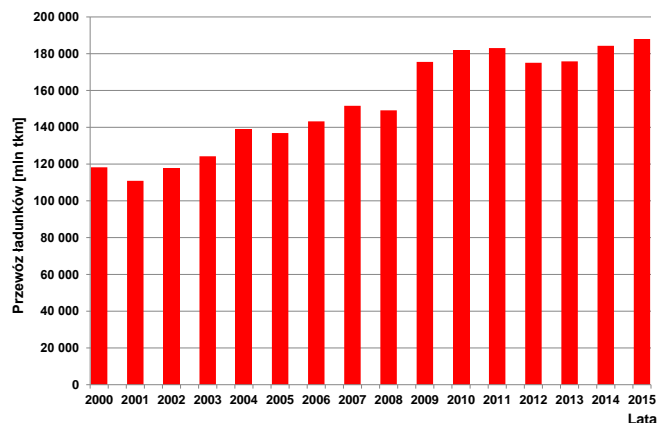
W artykule omówiono zagadnienie wpływu transportu lotniczego na środowisko naturalne. Jako podstawę rozważań przyjęto pojęcie zewnętrznych środowiskowych, obejmujące emisję hałasu oraz wpływ operacji lotniczych na jakość powietrza i zmianę klimatu. Hałas lotniczy jest najbardziej uciążliwy dla mieszkańców obszarów przyległych do lotnisk i stanowi główną barierę dla rozwoju infrastruktury lotniczej. Zanieczyszczenia emitowane przez statki powietrzne powodują wiele chorób oraz przyczyniają się do przedwczesnej śmiertelności. Operacje wykonywane na lotniskach zasadniczo wpływają na stan powietrza na obszarach do nich przyległych, jednak najnowsze badania wskazują, że emisja związków szkodliwych na wysokościach przelotowych, również wpływa na jakość powietrza. Powyższy fakt wymusza prace legislacyjne, mające na celu prowadzenie kontroli emisji związków szkodliwych w całym zakresie użytkowania statku powietrznego.

WSTĘP

Transport lotniczy ze względu na dużą prędkość oraz międzykontynentalny zasięg eksploatowanych środków transportu jest elementem ścisła zależności między tempem wzrostu największych gospodarek światowych i rozwojem przewozów lotniczych [18]. Porównując wzrost światowego PKB oraz ruchu lotniczego, zauważyć można, że tempo wzrostu przewozów lotniczych jest większe niż rozwój gospodarki światowej. Według analizy największych firm produkujących statki powietrzne (Airbus i Boeing) wynika to z faktu bardzo dynamicznego rozwoju przewozów niskokosztowych, zwiększania pojemności samolotów, wprowadzania nowej floty oraz dynamicznego rozwoju rynków wschodzących, takich jak: Chiny, Indie czy Japonia [3]. Rynki Dalekiego Wschodu zgodnie z prognozami wygenerują do roku 2029 największy wzrost wynoszący 31% światowych przewozów. Tak dynamiczny rozwój rynku azjatyckiego spowoduje, że 27% światowych przewozów lotniczych realizowanych będzie w Azji [3]. W ciągu ostatniej dekady odnotowano dwukrotny wzrost światowego przewozu pasażerów transportem lotniczym (rys. 1), natomiast światowy przewóz ładunków wzrósł o 50% (rys. 2).



Rys. 1. Światowy przewóz pasażerów transportem lotniczym w latach 2000–2015 [24]



Rys. 2. Światowy przewóz ładunków transportem lotniczym w latach 2000–2015 [24]

Rozwój transportu lotniczego wiąże się ze zwiększeniem zewnętrznych kosztów środowiskowych, które zgodnie z definicją Unii Europejskiej, obejmują skutki realizacji przewozów lotniczych związanych między innymi z zanieczyszczeniem powietrza, zmianami klimatycznymi i hałasem [6]. Przez ostatnie 50 lat powyższe negatywne skutki działalności transportu lotniczego zyskiwały na znaczeniu [12]. Skutkowało to tworzeniem regulacji prawnych przez wszelakie instytucje związane z bezpieczeństwem oraz nadzorem światowego lotnictwa. W 1960 roku ICAO (International Civil Aviation Organization) wprowadziło Annex 16 Environmental Protection, Volume I – International Noise Standards z późniejszym zastrzeżeniem przepisów w roku 1971 [1, 12]. W celu poprawy jakości powietrza w pobliżu lotnisk w 1980 roku wprowadzono SARP (Standards and Recommended Practices). Podsumowanie przepisów dotyczących emisji z silników lotniczych stanowi Annex 16: Environmental Protection, Volume II – Aircraft Engine Emissions, zawierający między innymi metodykę pomiarów tlenków azotu, węglowodorów, tlenku węgla oraz zadymienia spalin [12].

Istnieje wiele możliwości przeciwdziałania negatywnym skutkom działalności transportu lotniczego. Wśród nich wymienić można: nowoczesne konstrukcje statków powietrznych oraz silników lotniczych, zaawansowane zarządzanie ruchem lotniczym oraz wykorzystanie paliw alternatywnych. Wybierając daną strategię

ograniczania oddziaływania transportu lotniczego na środowisko, niezwykle istotne jest podejmowanie prawidłowych decyzji w długim horyzoncie czasowym. Koszty i zyski są często bardzo trudne do przewidzenia z uwagi na złożoność zagadnień wynikających między innymi z procesów rynkowych oraz polityki międzynarodowej. Decyzja o stosowaniu konkretnej technologii wiąże się z jej wprowadzeniem do lotnictwa w okresie nawet 10 lat zaś jej wykorzystywanie na kolejne 25 lat [12].

1. EMISJA HAŁASU

Hałas lotniczy jest najbardziej uciążliwym efektem działalności transportu lotniczego. Od początku lat 50-tych XX w. hałas był głównym powodem pojawiania się skarg płynących ze społeczności zamieszkujących obszary przyległe do lotnisk. W ramach działalności portu lotniczego istnieje wiele źródeł hałasu, jednak za najważniejszy i najbardziej szkodliwy uznaje się hałas związany ze statkami powietrznymi [1]. W samolotach odrzutowych źródłem hałasu są:

- strumienie gazów wylotowych,
- strumienie powietrza na wlotach do silników,
- drgania powstające na elementach płatowca (skrzydło, kadłub),
- praca wentylatorów, turbin, kompresorów, agregatów i innych urządzeń pomocniczych.

Hałas lotniczy dotyczy w głównej mierze ludzi zamieszkujących strefy wznoszenia, krążenia i oczekiwania. Uciążliwość hałasu w danym punkcie zależy od intensywności ruchu lotniczego, zaś jego ocena jest procesem bardzo złożonym i zależnym od indywidualnej wrażliwości mieszkańców [19].

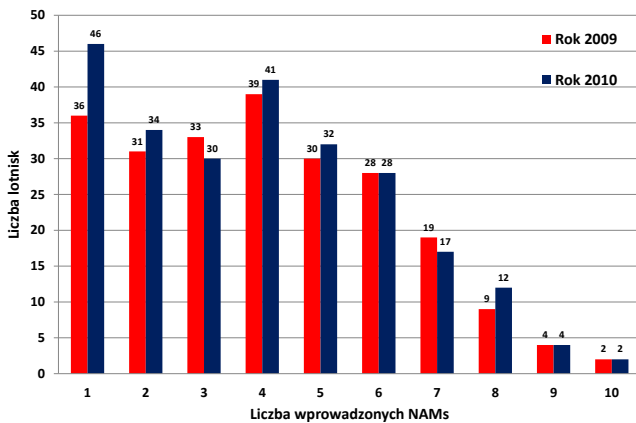
Z uwagi na zwiększającą się liczbę ludności, miasta rozszerzają swoje granice, coraz bardziej zbliżając się do portów lotniczych. Wzrost wolumenu transportowego skutkuje koniecznością rozbudowy i modernizacji portów lotniczych, powodując zwiększenie negatywnego wpływu transportu na ludność [6]. Powyższy fakt, stanowi bardzo istotny problem w kontekście nieuniknionego rozwoju infrastruktury lotniczej. Z tego względu zagadnienie hałasu lotniczego traktowane jest odrębnie, efektem czego są międzynarodowe inicjatywy na rzecz ograniczenia emisji hałasu. Jedną z nich jest wprowadzona przez ICAO we wrześniu 2001 roku uchwała (*Resolution A33-7*) [8], zawierająca rozwiązania dotyczące takiego zarządzania ruchem lotniczym, aby emisja hałasu była jak najmniej odczuwalna przez ludność zamieszkującą obszary w pobliżu portów lotniczych. Powyższy dokument za fundament zarządzania emisją hałasu przyjmuje cztery aspekty: zmniejszenie hałasu u źródła – rozwiązania techniczne i technologiczne dotyczące statków powietrznych i infrastruktury; planowanie i gospodarowanie przestrzenne – kwestie dotyczące rozwoju infrastruktury; zarządzanie operacjami startu i lądowania – dobieranie optymalnych ze względu na emisję hałasu trajektorii lądowań i startu; ograniczenia operacyjne statków powietrznych [6]. Wskazówki aplikacyjne dotyczące powyższych procedur mają charakter ogólny, a ich zastosowanie wymaga indywidualnej analizy danego portu lotniczego.

Wiele portów lotniczych uznało problem emisji hałasu za bardzo istotny wiele lat temu. Od roku 1992 firma Boeing prowadzi bazę danych zawierającą informacje o wprowadzonych środkach przeciwdziałania emisji hałasu – NAMS (*noise abatement measures*) – na lotniskach całego świata. Zgodnie z informacjami przedstawionymi przez Boeing [2] na świecie wprowadzono 18 procedur ograniczenia hałasu lotniczego:

- *Noise Abatement Procedures* – procedury dotyczące trajektorii startów i lądowań oraz techniki pilotażu,
- *Engine Run-Up Restrictions* – zasady dotyczące testowania silników oraz wykorzystania ciągu wstecznego,

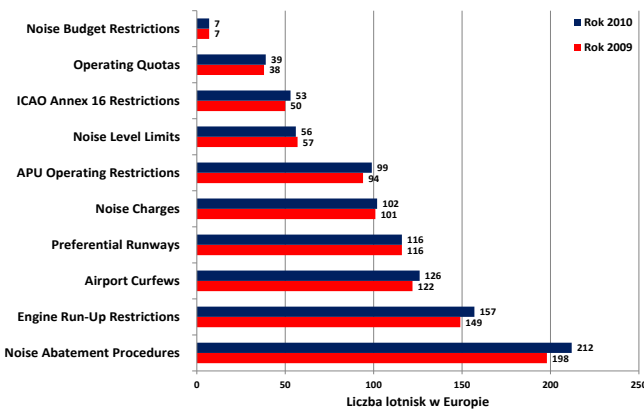
- *Preferential Runways* – wybór odpowiednich dróg dla startów i lądowań w przypadku występowania ich większej liczby,
- *Airport Curfews* – dotyczy przerw między startami i lądowaniami określonych grup statków powietrznych,
- *Noise Charges* – dodatkowe opłaty naliczane dla linii lotniczych, których statek powietrzny przekroczy dopuszczalną wartość emisji hałasu. Dodatkowo opłatami mogą zostać obciążone firmy wykorzystujące silniki starszej generacji (głośniejsze). Wartość naliczonych opłat zależy od pory dnia oraz masy statku powietrznego,
- *APU Operating Restrictions* – zakaz stosowania silników pomocniczych APU (*Auxiliary Power Unit*) przez samoloty znajdujące się na płycie lotniska. Rekomendowane jest wykorzystywanie mobilnych źródeł energii GPU (*Ground Power Units*),
- *Noise Level Limits* – wprowadzenie limitów hałasu generowanego w określonych punktach monitoringu. Przekroczenie ustalonej wartości skutkuje naliczeniem dodatkowych opłat dla linii lotniczej,
- *ICAO Annex 16 Chapter 2 and 3 Restrictions* – dotyczy zakazu lotów samolotów certyfikowanych na podstawie procedur zapisanych w rozdziałach drugim i trzecim tomu pierwszego aneksu 16 ICAO,
- *Operating Quotas* – dotyczy ograniczenia liczby komercyjnych lotów w danym okresie (np. zimowych lub letnim) oraz ograniczenie operacji lotniczych w godzinach maksymalnego ruchu lotniczego,
- *Noise Budget Restrictions* – dotyczy przydzielania określonego czasu dla danego statku powietrznego na lądowanie i start,
- *Sound Insulation (Residences and Public Buildings)* – stosowanie technik izolacji hałasu, polegających na implementacji rozwiązań technicznych takich jak przegrody tłumiące,
- *Purchase Assurance for Homeowners Located within the Airport Noise Contours* – udzielanie gwarancji wartości dla właścicieli nieruchomości znajdujących się na obszarach przyległych do lotnisk,
- *Avigation (Overflight) Easements* – odnosi się do umowy gwarantującej możliwość przelotów statków powietrznych nad określonymi posiadłościami, nawet jeśli powoduje to dyskomfort lub utratę wartości posiadłości,
- *Zoning Laws* – dotyczy zagospodarowanie przestrzennego w taki sposób, aby ograniczyć liczbę nieruchomości, znajdujących się na obszarze narażonym na emisję hałasu,
- *Real Estate/Property Disclosure Laws* – dotyczy określania rzeczywistej wartości nieruchomości z uwzględnieniem wpływu portu lotniczego,
- *Acquire Land for Noise Compatibility* – dotyczy nabycia nieruchomości będącej w pobliżu lotniska przez port lotniczy i relokację ludności na obszary niebędące pod wpływem hałasu lotniczego,
- *Population within Each Noise Contour Level Relative to Aircraft Operations* – dotyczy wyznaczania liczby ludzi będących narażonych na hałas lotniczy,
- *Airport Noise Contour Overlay Maps* – dotyczy tworzenia map akustycznych, pozwalających na określanie obszaru będącego pod wpływem hałasu lotniczego. Powyższe działania wykonywane są w celu uprzedzenia potencjalnych właścicieli nieruchomości o uciążliwych skutkach działalności transportu lotniczego.

Wymienione procedury przeciwdziałania emisji hałasu na obszarach portów lotniczych i do nich przyległych, są chętnie wprowadzane w Europie. Ze względu na złożoność zagadnienia hałasu, wymagane jest podejście kompleksowe. Z tego względu wiele portów lotniczych decyduje się na zastosowanie szeregu procedur wpływających na obniżenie emisji hałasu. Na rysunku 3 przedstawiono dane dotyczące liczby wprowadzonych procedur na europejskich lotniskach.



Rys. 3. Liczba wprowadzonych procedur NAMs na europejskich lotniskach w roku 2009 i 2010 [2]

Spśród zaproponowanych procedur ograniczenia hałasu lotniczego najczęściej stosuje się zalecenia dotyczące trajektorii startów i lądowań oraz techniki pilotażu (rys. 4). Bardzo popularne jest również wprowadzanie zasad testowania silników na lotniskach oraz używanie ciągu wstecznego.



Rys. 4. Rodzaje wprowadzonych procedur NAMs w roku 2009 i 2010 [2]

Hałas w miejscach zamieszkania jest coraz silniej odczuwalnym problemem. Wpływa na zdrowie ludzi i przeszkadza w codziennych czynnościach w pracy, w domu i szkole. Może powodować choroby układu krążenia, zakłóca sen i wypoczynek, wzmaga zdenerwowanie a także zmniejsza wydajność. Hałas jest również jednym z najbardziej ograniczających rozwój lotnictwa zagadnieniem. Wysiłek prowadzony przez porty lotnicze na rzecz ograniczenia emisji hałasu pozwalają na osiąganie oczekiwanych rezultatów. Istnieje jednak potrzeba wprowadzania nowych rozwiązań technicznych, gdyż z uwagi na zwiększający się wolumen przewożony, hałas staje się problemem coraz bardziej istotnym.

2. JAKOŚĆ POWIETRZA

Zagadnienie emisji zanieczyszczeń z silników spalinowych przyciąga duże zainteresowanie w środowisku naukowym oraz angażuje opinię publiczną ze względu na znany związek między narażeniem na działanie wielu substancji zanieczyszczających powietrze, a krótko i długoterminowymi skutkami dla zdrowia człowieka [13]. Dodatkowo, zanieczyszczenia pochodzenia silnikowego mogą wpływać na pogorszenie widoczności [7] oraz pośrednio lub bezpośrednio wpływać na klimat [15]. Podczas, gdy zanieczyszczenie powietrza jest głównym problemem krajów rozwijających się, gdzie odnotowuje się znaczny wzrost populacji i zapotrzebowania

na energię, to kraje rozwinięte odnotowały zmniejszenie stężenia wielu związków szkodliwych w ciągu ostatniej dekady.

Do najważniejszych toksycznych składników spalin zalicza się tlenki azotu (NO_x), tlenek węgla (CO), tlenki siarki (SO_x), węglowodory (HC) i cząstki stałe. Powyższe substancje stanowią do 1% całkowitej masy spalin, są jednak dużym zagrożeniem z uwagi na ich negatywny wpływ na zdrowie człowieka.

Spalanie paliw kopalnych zawierających w swoim składzie siarkę, skutkuje powstawaniem dwutlenku siarki, trójtlenku siarki oraz gazowej fazy kwasu siarkowego, które określane są jako tlenki siarki (SO_x). Emisja SO_x może skutkować formowaniem cząstek stałych wtórnych. Badania wskazują na związek między zarówno krótkotrwałą i długotrwałą ekspozycją na tlenki siarki a zachorowalnością na choroby układu oddechowego i przedwczesną umieralnością [21]. Nie określono czy negatywne efekty zdrowotne związane są bezpośrednio z indywidualnym występowaniem tlenków siarki w atmosferze czy są też powodowane przez mieszaniny substancji w skład których wchodzi SO_x .

Za tlenki azotu (NO_x) będące produktem spalania paliwa uznaje się tlenek azotu (NO) oraz dwutlenek azotu (NO_2). Związki te powstają w wyniku spalania paliwa przy dużej temperaturze i ciśnieniu. Na podstawie badań epidemiologicznych oraz testów prowadzonych na ludziach i zwierzętach stwierdzono wpływ tlenków azotu na występowanie chorób układu oddechowego, nawet przy czasowo niewielkiej ekspozycji na te substancje [20]. Dotychczasowe badania nie wskazują jednoznacznie, czy negatywny wpływ na układ oddechowy człowieka mają bezpośrednio tlenki azotu, czy też substancje wchodzące z nimi w reakcje chemiczne. Tlenki azotu sprzyjają powstawaniu ozonu w dolnych warstwach atmosfery. Ozon ma bardzo silne działanie utleniające, a w wyniku reakcji z jego udziałem, powstają w atmosferze tak zwane wolne rodniki, niebezpieczne dla organizmu ludzkiego ze względu na własności rakotwórcze. Ozon w dolnej warstwie atmosfery uszkadza również liście roślin. Jego silnie utleniające właściwości powodują także niszczenie materiałów, zwłaszcza gumy lub tekstyliów. Powstały ozon w dolnych warstwach atmosfery nie przyczynia się do uzupełnienia jego braku w ozonosferze. W celu rozpoczęcia procesu uzupełniania jego ilości w ozonosferze, stężenie tego związku w atmosferze musiałoby wzrosnąć o około 25%, co stanowiłoby realne zagrożenie dla życia organizmów. W kontekście emisji lotniczej zagadnienia związane z ozonem i jego wpływem na zdrowie ludzkie oceniane są na mało istotne w porównaniu z emisją cząstek stałych.

Jedną z podstawowych kwestii przy ocenie jakości powietrza jest stężenie cząstek stałych. Cząstki stałe to termin ogólnie używany na typ zanieczyszczeń powietrza, składający się z kompleksu różnych mieszanin cząstek zawieszonych, które różnią się wielkością, składem i miejscem tworzenia. Do głównych źródeł tworzenia tego rodzaju zanieczyszczenia zalicza się: fabryki, elektrownie, spalarnie, pojazdy silnikowe i wiele innych. Podstawowy podział cząstek stałych wynika z ich średnicy aerodynamicznej, który pozwolił na wyznaczenie dwóch głównych grup: $\text{PM}_{2,5}$ i PM_{10} (*Particulate Matter*) dla średnicy odpowiednio mniejszej niż $2,5 \mu\text{m}$ i $10 \mu\text{m}$. Dynamiczny rozwój badawczy zagadnienia cząstek stałych oraz zmiany ich właściwości w zależności od wielkości wymusiły wprowadzenie bardziej szczegółowego podziału. Przyjęto, że cząstki najdrobniejsze (*ultrafine particles*) to cząstki o średnicy poniżej $0,1 \mu\text{m}$ oraz cząstki drobne (*fine particles* lub nanocząstki) to cząstki mniejsze niż $1 \mu\text{m}$ [9].

Zanieczyszczenie atmosfery cząstkami stałymi emitowanymi przez silniki lotnicze wpływa negatywnie na zdrowie człowieka. Cząstki o średnicy $10 \mu\text{m}$ lub mniejsze mogą być przyczyną różnych chorób, przede wszystkim serca i płuc, i związanych z tym zgonów. Nasilenie się chorób jest łączone z długoterminowym

oddziaływaniem cząstek znajdujących się w otoczeniu. Przyczyniają się one do występowania takich chorób jak astma i zapalenie oskrzeli. Są też jedną z przyczyn arytmii serca i ataków serca. Najpoważniejsze problemy wynikają z oddziaływania cząstek drobnych. Najmniejszą odporność na negatywne oddziaływanie cząstek stałych wykazują ludzie z chorobami serca i płuc, osoby starsze oraz dzieci [14].

Przyjmuje się, że średnice cząstek stałych emitowanych przez silniki lotnicze nie są większe niż 2,5 μm i można je podzielić na cząstki pierwotne oraz wtórne. Cząstki stałe pierwotne złożone są z nielotnej frakcji węgla (głównie sadzy) i innych składników spalin, które gromadzą się na rdzeniu węglowym wykorzystując go jako jądro kondensacji. W skład cząstek pierwotnych wchodzi kwas azotowy i siarkowy, woda oraz ciężkie węglowodory zawierające do 30 atomów węgla. Średnice omawianych cząstek osiągają wartości kilkudziesięciu nanometrów.

Cząstki stałe wtórne powstają w wyniku reakcji cząstek stałych pierwotnych i innych toksycznych składników spalin, takich jak tlenki azotu, tlenki siarki i lekkie węglowodory. Produktami reakcji zachodzących na cząstkach stałych, które można odnaleźć w składzie cząstek wtórnych to: siarczan amonu, azotan amonu oraz inne związki, głównie węglowodory. Powstałe wtórne cząstki stałe utrzymują się w powietrzu od kilku godzin do kilku dni, wpływając na stężenie pyłów na obszarach przyległych do lotnisk. Badania wskazują, że aż 70% cząstek stałych emitowanych przez silniki lotnicze związane jest z emisją tlenków azotu, 14% stanowią cząstki stałe pierwotne, 12% cząstek stałych związanych jest z tlenkami siarki, a 4% formuje się z udziałem węglowodorów [4].

Ekspozycja na działanie cząstek stałych skutkuje zwiększeniem ryzyka zachorowalności na choroby układu krążenia oraz oddechowego i powoduje przedwczesną umieralność. W przypadku przedwczesnych zgonów, dominującą rolę mają cząstki stałe wtórne, głównie wytworzone na bazie prekursorów azotowych i siarkowych [4]. Drugorzędną rolę pełnią w tej kwestii cząstki stałe pierwotne oraz te związane z emisją węglowodorów. Wiele publikacji wskazuje, iż emisja cząstek stałych ma dominujące znaczenie w kwestii negatywnych efektów zdrowotnych i znacznie przewyższa w tej kwestii emisję pozostałych toksycznych składników spalin [4, 17, 23].

Konwencjonalne podejście do emisji związków toksycznych z silników lotniczych zakłada jej kontrolę jedynie w fazach startu, lądowania i kołowania statku powietrznego. Rozważane operacje lotnicze, które są przedmiotem analiz wpływu transportu lotniczego na jakość powietrza odbywają się na pułapie do 3000 stóp. Świadczą o tym przepisy certyfikacji silników lotniczych (ICAO Aneks 16), stworzone z założeniem ograniczenia emisji spalin na obszarach przyległych do lotnisk. Aktualne badania wskazują jednak, że emisja na wysokościach przelotowych (powyżej 3000 stóp), może stanowić istotną część całkowitej emisji spalin wpływającej na zdrowie człowieka [22]. Może okazać się, że dalsze badania i przyszłe oceny oddziaływania lotnictwa na jakość powietrza zawierają pełną emisję w celu uwzględnienia całkowitego wpływu statków powietrznych na stan atmosfery.

3. ZMIANY KLIMATYCZNE

Zmiany klimatyczne wymuszone przez człowieka spowodowane są przez emitowanie gazów cieplarnianych. Miarą dodatkowego antropogenicznego efektu cieplarnianego, jest wielkość wymuszenia promieniowania RF (*radiative forcing*) wyrażana w W/m^2 . Zgodnie z aktualną wiedzą, lotnictwo wpływa na klimat Ziemi poprzez następujące procesy:

- emisję CO_2 ,

- emisję NO_x prowadzącą do formowania się ozonu w troposferze,
- emisję cząstek stałych (w tym tzw. *black carbon*),
- tworzenie się smug kondensacyjnych,
- tworzenie smugowych chmur pierzastych (*contrail-cirrus cloud*),
- emisję pary wodnej [10].

Dwutlenek węgla pochodzenia lotniczego wpływa tak samo na klimat jak CO_2 z każdego innego źródła, przyczyniając się jego do ocieplania. Opisujący gaz cieplarniany charakteryzuje się bardzo długim czasem utrzymywania w atmosferze (nawet kilkadziesiąt lat). Przeciwdziała wydostawaniu się promieniowania podczerwonego z planety, pochłaniając je i oddając do atmosfery, w wyniku czego następuje zwiększenie temperatury jej powierzchni.

Inny gazem cieplarniany jest para wodna, która uznawana jest za najsilniejszy gaz cieplarniany. Na każde 100 cząsteczek gazów cieplarnianych w atmosferze, 90 to cząsteczki pary wodnej. Skupia się blisko powierzchni Ziemi, tymczasem pozostałe gazy cieplarniane zalegają w wyższych warstwach atmosfery. Odpowiada ona jednak za największe dodatnie sprzężenie w systemie klimatycznym. Wzrost temperatury wzmacnia parowanie wody, co prowadzi do pogłębiania efektu cieplarnianego, który ponownie powoduje zwiększenie parowania. Z uwagi na powyższe sprzężenie klimat jest bardzo wrażliwy na ocieplenie spowodowane emisją pary wodnej pochodzenia antropogenicznego.

Tlenki azotu to kolejne związki chemiczne wpływające na zmianę klimatu. W przeciwieństwie do dwutlenku węgla, tlenki azotu charakteryzują się pośrednim oddziaływaniem. Powodują ocieplenie klimatu przez formowanie ozonu oraz na ochłodzenie klimatu powodując rozkład metanu. Emisja NO_x powoduje zwiększenie zdolności utleniających atmosfery, co w konsekwencji wpływa na zmniejszenie stężenia metanu. Oddziaływanie tlenków azotu na klimat jest zagadnieniem wieloaspektowym, często uzależnionym od rozpatrywanego miejsca na Ziemi oraz o charakterze sezonowym. Krótkotrwały, trwający kilka miesięcy efekt ocieplenia atmosfery z uwagi na utworzony ozon jest zauważalny głównie na półkuli północnej, gdzie liczba operacji lotniczych jest znacznie większa niż na południu. Jego występowanie uzależnione jest również od izolacji słonecznej Ziemi, w związku z czym zjawisko jest sezonowe. Z kolei rozważając efekt ochładzania klimatu spowodowany zależnością między NO_x – O_3 – NH_4 , zauważyć można efekt w skali globalnej, gdyż powyższa zależność ma charakter ciągły. Rozważając powyższe zjawiska o przeciwstawnym charakterze, można stwierdzić, że w skali globalnej równoważą się. Analizując jednak wpływ tlenków azotu na klimat w aspekcie regionalnym, stwierdzono ocieplenie półkuli północnej i ochłodzenie południowej [1].

Powstawanie smug kondensacyjnych oraz chmur pierzastych z utrzymujących się smug powoduje ocieplenie klimatu. Powyższy efekt uzależniony jest głównie od emisji pary wodnej oraz warunków otoczenia (ciśnienie, temperatura i wilgotność). Smugi kondensacyjne utrzymują się przez kilka godzin, natomiast chmury pierzaste od kilku godzin do kilku dni. Ze względu na krótki okresowo i miejscowy charakter zjawiska, jego wpływ na klimat jest miejscowy [1, 11].

W przypadku emisji z silników lotniczych, jednym z głównych toksycznych składników spalin są cząstki stałe. W kwestii ich wpływu na klimat używa się pojęcia czarnego węgla BC (*black carbon*). Czarny węgiel jest składnikiem cząstek stałych mający właściwość bardzo silnego pochłaniania światła [16]. Powstaje wskutek niecałkowitego i niezupełnego spalania paliw kopalnych, biopaliw i biomasy. Oprócz pochodzenia antropogenicznego może mieć również pochodzenie naturalne. Definiuje się go jako stałą postać czystego węgla absorbującą promieniowanie słoneczne (światło) w całym zakresie długości fal. Jego tworzenie zawsze wiąże się z emisją

innych cząstek stałych oraz związków gazowych takich jak tlenki azotu i tlenki siarki. Czarny węgiel powoduje ocieplenie planety oraz sprzyja topnieniu lodowców redukując albedo, czyli zdolność do odbijania promieni słonecznych skierowanych na śnieg lub lód.

PODSUMOWANIE

Zagadnienie zewnętrznych kosztów środowiskowych transportu lotniczego jest bardzo złożone i wymaga indywidualnego podejścia do każdego z nich. Hałas towarzyszący działalności lotniczej niewątpliwie zalicza się do najbardziej uciążliwych jego efektów. Jego negatywne oddziaływanie bezpośrednio na człowieka objawia się powodowaniem rozdrażnienia czy też problemów z koncentracją. Oprócz wpływu na ludzkie zdrowie, coraz większym problem wydaje się być aspekt ekonomiczny, objawiający się utratą wartości nieruchomości znajdujących się w strefach hałasu lotniczego.

Emisja związków szkodliwych z silników lotniczych utożsamiana jest z pogorszeniem jakości powietrza oraz zaburzeniem naturalnego stanu klimatu i składu atmosfery. Aktualnie niekorzystny wpływ działalności transportu lotniczego na skład powietrza sprawdzany jest do analizy emisji związków toksycznych poniżej pułapu 3000 stóp. Głównie wynika to z przepisów certyfikacji statków powietrznych, które zakładają, że negatywny wpływ operacji lotniczych to jedynie te, wykonywane na obszarze przyległym do lotniska. Coraz więcej badań naukowych potwierdza fakt, że analiza wpływu lotnictwa na jakość powietrza musi być poszerzona o emisję związków szkodliwych również na pułapie przelotowym, wymuszając tym samym działalność legislacyjną.

Bez wątpienia transport lotniczy jest istotnym źródłem emisji gazów cieplarnianych. Oprócz emisji dwutlenku węgla i pary wodnej, które bezpośrednio wpływają na ocieplenie klimatu, statki powietrzne emitują związki, które pośrednio i często niejednoznacznie wpływają na zmiany klimatu. Powyższe zagadnienie jest bardzo złożone i często o charakterze regionalnym.

BIBLIOGRAFIA

- Annex 16: Environmental protection, vol. I: Aircraft noise, 4th ed. ICAO.
- Boeing, Airports with noise and emissions restrictions, 2014.
- Boeing, Current market outlook 2015–2034, Business & Market Environment, 2015.
- Brunelle-Yeung E., The impacts of aviation emissions on human health through changes in air quality and UV irradiance, Masters of science thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2009.
- Ganic E., Netjasov F., Babic O., Analysis of noise abatement measures on European airports, "Applied Acoustics" 2015, nr 92.
- Huderek-Glaska S., Koszty zewnętrzne transportu lotniczego, „Logistyka” 2014, nr 2.
- Hyslop N.P., Impaired visibility: the air pollution people see. "Atmospheric Environment" 2009, nr 43.
- ICAO, Resolutions adopted at the 33rd session of the Assembly. Montreal. Canada 2001.
- Kampa M., Castanas E., Human health effects of air pollution. "Environmental Pollution" 2008, nr 151.
- Lee D.S., Pitari G., Grewec V., Gierens K., Penner J.E., Petzold A., Prather M.J., Schumann U., Bais A., Bernsten T., Iachetti D., Lim L.L., Sausen R., Transport impacts on atmosphere and climate: Aviation, "Atmospheric Environment" 2010, nr 44.
- Macintosh A., Wallace L., International aviation emissions to 2025: Can emissions be stabilised without restricting demand? "Energy Policy" 2009, nr 37.
- Mahashabde A., Wolfe P., Ashok A., Dorbian C., He Q., Fan A., Lukachko S., Mozdzanowska A., Wollersheim C., Barrett S., Locke M., Waitz I., Assessing the environmental impacts of aircraft noise and emissions, "Progress in Aerospace Sciences" 2011, nr 47.
- Masiol M., Harrison M., Aircraft engine exhaust emissions and other airport-related contributions to ambient air pollution: A review, "Atmospheric Environment" 2014, nr 95.
- Pielecha J., Identyfikacja parametrów cząstek stałych z silników spalinowych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2012.
- Ramanathan V., Feng Y., Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives, "Atmospheric Environment" 2009, nr 43.
- Report to Congress on black carbon, black carbon and its effects on climate, Chapter 2.
- Rojo J., Future trends in local air quality impacts of aviation, S.M. thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2007.
- Tłoczyński D., Sytuacja finansowa i perspektywy rozwoju światowego transportu lotniczego, "Logistyka" 2015, nr 3.
- Tomaszewski F., Misztal W., Oddziaływanie hałasu lotniczego na środowisko, "Czasopismo Techniczne" 2012, nr 109.
- US EPA, Integrated science assessment for oxides of nitrogen – health criteria, 2008.
- US EPA, Integrated science assessment for sulfur oxides – health criteria, 2008.
- US FAA, Environmental tool suite frequently asked questions.
- Watkins P., Pye S., Holland M., Baseline scenarios for servicecontract for carrying out cost-benefits analysis of air quality related issues, in particular in the clean air for Europe (CAFE) program, "AEA Technology Environment" 2005.
- www.stat.gov.pl

Environmental costs of air transport activities

Paper discussed the issue of the impact of air transport on the environment. As a basis for deliberations adopted the concept of external environmental costs, including noise and the impact of airport operations on air quality and climate change. Aircraft noise is the most troublesome for the residents of areas adjacent to the airport and is a major barrier to the development of aviation infrastructure. Pollution emitted by aircraft cause a number of diseases and contribute to premature mortality. Operations performed at airports are essential to the condition of the air in the areas adjacent to them, but recent research indicates that emissions of harmful compounds at higher altitudes, also affects air quality. This fact forces the legislative work aimed at carrying out the emission of harmful compounds in the entire range of the aircraft operation.

Autorzy:

mgr inż. **Remigiusz Jasiński** – Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, Polska, tel. +48 61 665 2118, e-mail: remigiusz.w.jasinski@doctorate.put.poznan.pl

dr hab. inż. **Jacek Pielecha** – Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, Polska, tel. +48 61 665 2118, e-mail: jacek.pielecha@put.poznan.pl

dr hab. inż. **Jarosław Markowski** – Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, Polska, tel. +48 61 647 5992, e-mail: jaroslaw.markowski@put.poznan.pl

mgr inż. **Paweł Benedict** – WSK „PZL-KALISZ” S.A., ul. Częstochowska 140, 62-800 Kalisz, tel. +48 600 458 060, e-mail: benek.su27@wp.pl