KOSMOS
PROBLEMY NAUK BIOLOGICZNYCH

Tom 65 **2016**
Numer 4 **(313)**
Strony **477–486**

Polskie Towarzystwo Przyrodników im. Kopernika

MACIEJ CHOLEWIŃSKI[1], MICHAŁ KAMIŃSKI[2], WOJCIECH POSPOLITA[3]

[1]Katedra Technologii Energetycznych
Turbin i Modelowania Procesów Cieplno-Przepływowych
Wydział Mechaniczno-Energetyczny
Politechnika Wrocławska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
[2]Zakład Niskoemisyjnych Źródeł Energii i Gospodarki Odpadami
Instytut Inżynierii Rolniczej
Wydział Przyrodniczo-Technologiczny Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
C. K. Norwida 25, 50-375 Wrocław
[3]Zakład Mechaniki i Systemów Energetycznych
Wydział Mechaniczno-Energetyczny
Politechnika Wrocławska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
E-mail: maciej.cholewinski@pwr.edu.pl

ZAGROŻENIA DLA ZDROWIA I ŻYCIA CZŁOWIEKA WYNIKAJĄCE ZE STOSOWANIA WYBRANYCH PALIW W INDYWIDUALNYCH INSTALACJACH GRZEWCZYCH

WSTĘP

Systematyczny wzrost zapotrzebowania na różne formy energii odnotowywany w ostatnich latach, stanowi jeden z wyznaczników postępu wielu społeczeństw świata. Poszukiwania tanich, wysokosprawnych i dyspozycyjnych technologii energetycznych, spełniających wymogi zmiennego popytu na energię elektryczną, ciepło i chłód niejednokrotnie odbiegają od idei zrównoważonego rozwoju i poszanowania środowiska naturalnego. Szczególną uwagę należy zwracać na organizację procesu spalania i dobór paliw w instalacjach komunalnych i zawodowych, gdyż są one często głównymi źródłami emitowanych zanieczyszczeń odpowiedzialnych w znacznym stopniu za wzmożoną degradację ekosystemów. Podjęte w ostatnich latach działania proekologiczne mają na celu zasadniczą reorganizację sektora energetycznego tak, aby jego działalności towarzyszyła jak najmniejsza presja środowiskowa związana z emisją substancji szkodliwych oraz składowaniem odpadów. Dotyczą one zarówno dużych, jak i mniejszych jednostek tego sektora i powinny być proporcjonalne do stopnia uciążliwości danej technologii energetycznej dla środowiska. Zarówno ilość, jak i skład emitowanych zanieczyszczeń bardzo zależą od wyboru paliwa, stosowanych instalacji ochrony atmosfery oraz sposobu eksploatacji jednostek i przyjętych priorytetów ekonomicznych. Z instalacji energetycznych realizujących procesy spalania paliw, emitowane są tlenki azotu i siarki, lotne związki organiczne (w tym wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne, WWA), fenole, dioksyny, furany, metale ciężkie, związki fluoru i chloru cząstki popiołów lotnych (NOCOŃ i współaut. 2007, KORDYLEWSKI 2008). Wymienione substancje są mobilne w środowisku i podlegając licznym transformacjom, stanowią bezpośrednie lub pośrednie zagrożenie dla człowieka i innych żywych organizmów. W zależności od form ich występowania, pochłoniętej dawki, czasu kontaktu i akumulacji w organizmie mogą doprowadzić do poważnych chorób i skrócenia życia. Szczególną uwagę należy zwrócić na małe, indywidualne jednostki grzewcze będące źródłami emisji niemal wszystkich wymienionych

Słowa kluczowe: emisja zanieczyszczeń, ogrzewnictwo, spalanie paliw, zdrowie człowieka

zanieczyszczeń (KOBIZE 2015). Ograniczenie ich negatywnego wpływu na otoczenie sprowadza się w zasadzie do doboru właściwego paliwa oraz korzystania ze sprawnych i nowoczesnych instalacji energetycznych. Celem pracy jest opis procesu spalania powszechnie wykorzystywanych paliw i ocena toksyczności zanieczyszczeń emitowanych przez indywidualne ogrzewnictwo, w porównaniu do emisji z instalacji energetyki zawodowej.

PROBLEMY NISKIEJ EMISJI

Jednym z priorytetów rozwoju gospodarki energetycznej przyjaznej środowisku jest ograniczenie ilości zanieczyszczeń wprowadzanych do otoczenia w postaci tzw. niskiej emisji. Stanowią ją toksyczne składniki spalin wydobywających się z emitorów usytuowanych na wysokości poniżej 40 m n.p.t. (kominów kotłowni indywidualnych, pieców grzewczych, palenisk domowych, układów wydechowych pojazdów drogowych), a więc w większości przypadków ze źródeł zlokalizowanych w sektorze transportu i komunalno-bytowym (GINARSKI 2015). Niska emisja jest szczególnie niebezpieczna w przypadku niedostatecznego wyniesienia spalin i wystąpienia niekorzystnych warunków meteorologicznych prowadzących do lokalnej akumulacji składników toksycznych w postaci smogu. Tego rodzaju sytuacje najczęściej występują w okresach grzewczych na obszarach, gdzie dominują paleniska opalane węglem (NIK 2014, LACHMAN 2015). Oprócz zanieczyszczeń emitowanych w procesach spalania paliw (związanych m.in. z gęstością zaludnienia oraz strukturą techniczną lokalnego sektora ogrzewnictwa) na intensywność akumulacji niebezpiecznych substancji mają wpływ także warunki meteorologiczne (prędkość i zmienność wiatrów, pionowy gradient temperatury), ukształtowanie i rodzaj pokrycia terenu oraz uzyskiwane wyniesienia spalin (ZWOŹDZIAK i współaut. 1998). Problem wysokich stężeń zanieczyszczeń w bezpośrednim otoczeniu skupisk ludzkich w przypadku elektrowni i elektrociepłowni jest w części rozwiązywany poprzez budowę i wykorzystywanie wysokich kominów (najwyższe w Polsce mają 250–300 m wysokości). W przypadku niskiej emisji, gdy wysokość emitorów jest relatywnie niska, czynniki meteorologiczne i topograficzne mają dominujący wpływ na powstawanie lokalnych obszarów zwiększonych stężeń toksyn. Spośród wymienionych parametrów na szczególną uwagę zasługuje wartość pionowego gradientu temperatury. Najczęściej konwekcyjne ruchy gorących mas powietrza wynoszą spaliny do górnych warstw troposfery, gdzie są one ochładzane. W taki sposób powstaje dodatni gradient temperaturowy. Zdarza się jednak, że wartość gradientu przybiera wartości ujemne (np. ze względu na obszarowe ograniczenie efektów konwekcji, nadchodzące fronty atmosferyczne, turbulencje, osiadanie mas powietrza w wyżu), dochodzi wówczas do zjawiska inwersji termicznej i zatrzymania pionowej wymiany powietrza. Do takiej sytuacji przyczyniają się także niekorzystne warunki topograficzne (np. kotliny górskie, gdzie ograniczone jest mieszanie się spalin z zimnym powietrzem i utrudniony napływ jego nowych mas). Gdy inwersja występuje przez dłuższy czas, wzmaga się gromadzenie różnych grup zanieczyszczeń w postaci smogu, a tym samym akumulacja emitowanych zanieczyszczeń w bliskim otoczeniu źródeł ich powstawania.

W Polsce powietrze w wielu skupiskach ludzkich należy do najgorszych na terenie całej Unii Europejskiej (GINARSKI 2015). Szczególną uwagę zwraca się w tym przypadku na ponadnormatywne stężenia takich substancji szkodliwych jak pyły zawieszone (ang. particulate matter, PM; głównie PM_{10} i $PM_{2,5}$; 10 i 2,5 – wielkość największych drobin w μm), wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne, dioksyny i furany (ang. polychlorinated dibenzofurans, PCDD/Fs) oraz inne, m.in. tlenki kwasowe (NO_x, SO_x) i metale ciężkie, związane m.in. z powszechnym ogrzewnictwem indywidualnym, w którym wykorzystywane są paliwa stałe (LACHMAN 2015). Raporty Światowej Organizacji Zdrowia wykazują, iż spośród 50 najbardziej zanieczyszczonych miast Unii Europejskiej aż 33 zlokalizowane są w Polsce, z czego 7 znajduje się w pierwszej dziesiątce. Na pierwszym miejscu jest Żywiec (średnie roczne stężenie pyłów $PM_{2,5}$ na poziomie 43 $\mu g/m^3$), a na drugim Pszczyna. Dalsze pozycje zajmują m.in. Rybnik i Wodzisław Śląski (WHO 2016). Indywidualne systemy grzewcze odpowiadają za 32% ładunku pyłów $PM_{2,5}$ i za 45% pyłów PM_{10}, podczas gdy transport dostarcza ich odpowiednio 19% ($PM_{2,5}$) i 8% (PM_{10}) (KARAGULIAN i współaut. 2015). Największe na świecie stężenie $PM_{2,5}$ odnotowano w Iranie (miasto Zabol – ponad 210 $\mu g/m^3$), Indiach, Arabii Saudyjskiej, Chinach, Pakistanie i większych aglomeracjach Afryki, gdzie stężenie $PM_{2,5}$ przekraczają średniorocznie 100 $\mu g/m^3$. Należy zaznaczyć, że już znacznie mniejsze wartości (m.in. te występujące w Polsce) stanowią niebezpieczeństwo dla zdrowia człowieka (WHO 2016). Z oszacowania wynika, iż pośrednio z powodu niskiej emisji w Polsce życie traci około 45 tys. osób rocznie (NIK 2014). Jest to ponad 10 razy więcej niż powodują wypadki samochodowe (LACHMAN 2015).

Historycznym przykładem nagromadzenia zanieczyszczeń na obszarze wielkiej aglomeracji jest tzw. smog londyński, który w dniach 5–9 grudnia 1952 r. nawiedził stolicę Wielkiej Brytanii, powodując śmierć ok. 12 tysięcy ludzi z powodu niewydolności płuc i trwałego uszkodzenia układu oddechowego. Przyczyną były bardzo niekorzystne warunki pogodowe (inwersja termiczna) powodujące stagnację ruchu powietrza przy znacznej emisji zanieczyszczeń (cząstek stałych i tlenków siarki) z kominów budynków mieszkalnych i fabryk. Przypadek Wielkiego Smogu stanowił początek zmian w brytyjskim prawodawstwie, dotyczących jakości lokalnego powietrza atmosferycznego i zapobiegania zagrożeniom związanym z niską emisją. Smog ten, utworzony przez mieszaninę pyłów i tlenków siarki rozpuszczonych w kropelkach mgły (zawiesiny słabego kwasu siarkowego), nazwano smogiem kwaśnym.

CHARAKTERYSTYKA WYBRANYCH ZANIECZYSZCZEŃ W PROCESACH SPALANIA ORAZ ICH WPŁYW NA ZDROWIE CZŁOWIEKA

Skutki wprowadzania do otoczenia zanieczyszczeń z procesów energetycznych, w zależności od reaktywności poszczególnych substancji, warunków pogodowych (intensywności migracji, nasłonecznienia) czy też składu atmosfery (np. lokalnej obecności ozonu lub pary wodnej) mogą mieć zasięg lokalny, kontynentalny bądź globalny.

Poważne zagrożenie stanowią związki siarki (siarka wchodzi w skład paliwa). W spalinach kotłowych występują one w postaci SO_3 oraz SO_2 (ponad 95% wszystkich tlenków siarki). Dwutlenek siarki po dostaniu się do atmosfery ulega stopniowemu utlenieniu (w ciągu 1–4 dni) do trójtlenku siarki, który dobrze rozpuszcza się w wodzie zawartej w atmosferze, tworząc kwas siarkowy. Część związków siarki może zostać związana przez alkaliczne składniki popiołów lotnych (KORDYLEWSKI 2008). Rozcieńczony kwas siarkowy w wodach opadowych zyskał określenie kwaśnego deszczu, który przyczynia się do zakwaszania gleb i intensyfikacji uwalniania metali ciężkich (pośrednio poprzez wypłukiwanie potasu), a także zatruwania zbiorników i cieków wodnych. W kontakcie z organizmem człowieka kwas siarkowy działa drażniąco na błony śluzowe, powodując stany zapalne i trudności z oddychaniem. Przyspiesza on także korozję konstrukcji metalowych i kruszenie budowli kamiennych. Emisja tlenków siarki i tlenków azotu oraz popiołów zależy zarówno od rodzaju spalanego paliwa (zawartości siarki), jak i technologii spalania oraz użytych instalacji do wychwytu ich ze spalin (KORDYLEWSKI 2008).

Podczas spalania powstają tlenki azotu NO i NO_2 (NO_x) oraz N_2O, które oprócz zakwaszania deszczy (mechanizm powstawania kwasu podobny jak w przypadku SO_2), powodują szereg innych zagrożeń środowiskowych (RYBAK 2006). Tlenki azotu są resorbowane w ośrodkowym układzie nerwowym (NOCOŃ i współaut. 2007) i obniżają odporność organizmów żywych (NO wiąże hemoglobinę we krwi nawet o kilka rzędów intensywniej niż CO). Tlenek NO wpływa także na procesy wegetacyjne roślin (JAROSIŃSKI 1996), przyspiesza korozję konstrukcji metalowych, a w górnych warstwach atmosfery może przyczyniać się do rozkładu ozonu stratosferycznego. Ze względu na swoją znaczną reaktywność NO dość szybko ulega utlenieniu do NO_2, przez co jego lokalna inwazyjność zmniejsza się z czasem, a wpływ na organizmy żywe traktuje się na równi ze skutkami kontaktu ze stabilniejszym NO_2 (jego czas przebywania w atmosferze do kilku dni). Tlenki azotu obecne w powietrzu podrażniają drogi oddechowe i rogówki oczu (JAROSIŃSKI 1996).

W podwyższonej temperaturze i przy dużym nasłonecznieniu ma miejsce reakcja fotochemiczna, w wyniku której następuje fotoliza NO_2 do NO i wolnego tlenu, który przyłącza się następnie do cząsteczki O_2 tworząc trójatomową cząsteczkę ozonu. Powstający w przyziemnej warstwie atmosfery ozon troposferyczny silnie podrażnia śluzówkę dróg oddechowych, wywołuje ataki astmy, uszkadza oskrzela i zwiększa wrażliwość na infekcje. Ozon reaguje z lotnymi węglowodorami (ze spalin motoryzacyjnych), wytwarzając bardzo toksyczne związki nadtlenkowe. Lotna mieszanina tlenków azotu, ozonu i nadtlenków tworzy tzw. smog fotochemiczny (nazywany także smogiem typu Los Angeles). Powstający podczas spalania podtlenek azotu (N_2O) jest związkiem mało aktywnym, jednak należy go uznać za produkt niebezpieczny dla środowiska głównie ze względu na jego trwałość w atmosferze (100-200 lat) i właściwość silnego wzmacniania efektu cieplarnianego. Jeden kg N_2O uwolniony do atmosfery zwiększa efekt cieplarniany podobnie jak wyemitowane 298 kg CO_2. Zarówno NO, jak i NO_2 należy traktować w pierwszej kolejności jako zanieczyszczenia o charakterze lokalnym, a N_2O globalnym (KORDYLEWSKI 2008). Ich emisja zależy zarówno od ilości azotu w paliwie (związanej z tzw. tlenkami paliwowymi, zwykle poniżej 1% masy paliwa), jak i samej specyfiki procesu spalania, determinującej tworzenie tzw. tlenków termicznych i „szybkich" (RYBAK 2006).

Poza związkami gazowymi, w spalinach obecne są także cząstki stałe. Spalaniu paliw zawierających substancje mineralne lub ciężkie węglowodory towarzyszy zjawisko unoszenia różnego typu pyłów popiołowych. O ile ich wpływ na wymianę ciepła w palenisku jest korzystny (intensyfikują one intensywność radiacji między płomieniem i gazami odlotowymi a ściankami wymienników ciepła), o tyle uwolnione do otoczenia stanowią poważne zagrożenie dla środowiska. Są to głównie drobiny tlenków krzemu, glinu, żelaza, wapnia, metali ciężkich (kumulujących się w popiele), pierwiastków śladowych oraz kondensujących na ich powierzchni WWA (MEIJ 1997). Małe cząstki popiołów lotnych stanowią zagrożenie dla zdrowia również ze względu na swoje wymiary. W zależności od parametrów procesu spalania i stopnia rozdrobnienia paliwa, ich wielkość obejmować może także zakres drobin poniżej 2,5 μm (LI i współaut. 2007). Takie cząstki mogą bezpośrednio wnikać do pęcherzyków płucnych (dlatego zwane są respirabilnymi) i dalej do krwi, nagromadzając w organizmie wiele toksyn.

Poza pyłami popiołowymi, do cząstek stałych w spalinach zaliczana jest także sadza płomieniowa, stanowiąca produkt niecałkowitego spalania prawie wszystkich paliw. Sadza stanowi mieszaninę węgla pierwiastkowego (ok. 90%) i wodoru (pozostałe 10%) o specyficznej, unikatowej budowie wewnętrznej (KORDYLEWSKI 2008). Ze względu na wielkość tych cząstek (poniżej 10 μm) i ich dużą zdolność adsorpcyjną, kondensują one na powierzchni szereg niebezpiecznych substancji, m.in. WWA i kwas siarkowy. Z tego też względu sadza jest uznawana za zanieczyszczenie kancerogenne (BOCKHORN 1994). Powstawanie sadzy w płomieniu uwarunkowane jest zarówno parametrami procesowymi (specyfiką płomienia, temperaturą, ciśnieniem, czasem przebywania spalin w komorze, przebogaceniem mieszanki), typem paleniska (np. ze stałym rusztem, gdzie sadza może stanowić nawet 90% stałej substancji obecnej w spalinach), jak i rodzajem spalanego paliwa. Najmniej sadzy wytwarzane jest podczas spalania paliw gazowych (WILK 2001). Pojawienie się sadzy objawia się dymieniem, które świadczy o niedostatecznym wypaleniu paliwa. O niedoskonałości procesu spalania niemal każdego paliwa informuje zarówno obecność w spalinach sadzy, jak i CO. Tlenek węgla jest półproduktem utleniania paliw węglowych i węglowodorowych, stąd też jego występowanie sugerować może istnienie w obszarze komory paleniskowej lokalnych niedomiarów utleniacza lub też zbyt krótki czas przebywania produktów spalania w strefie wysokiej temperatury i w konsekwencji niecałkowite utlenienie paliwa. Trujące działanie tlenku węgla na ludzki organizm jest związane z blokadą transportu tlenu przez hemoglobinę, która w połączeniu z CO tworzy cząsteczki karboksyhemoglobiny. Krew staje się niezdolna do transportu tlenu, czyli do jego odwracalnego przyłączania i oddawania w tkankach organizmu. Tlenek węgla bardzo łatwo wypiera tlen w połączeniach z hemoglobiną, ponieważ przejawia blisko 200-krotnie większe powinowactwo niż O_2, a następnie przeciwdziała jego późniejszemu uwalnianiu (JAROSIŃSKI 1996). Tlenek węgla po uwolnieniu do atmosfery ulega naturalnemu utlenieniu do CO_2. Parametry powodujące nadmierną obecność tlenku węgla w spalinach są odpowiedzialne również za emisję węglowodorów w niemal wszystkich systemach spalania różnych paliw kopalnych.

Mnogość reakcji i złożoność mechanizmów sprawiają, iż do zanieczyszczeń tego typu zalicza się kilkaset związków organicznych prostych i policyklicznych, zarówno fizjologicznie obojętnych, jak i niezwykle niebezpiecznych dla organizmu ludzkiego (JAROSIŃSKI 1996). Do najgroźniejszych należą substancje kancerogenne, odory, substancje podrażniające błony śluzowe, oddziałujące narkotycznie (ZAKRZEWSKI 1995). Do szczególnie niebezpiecznych związków należą silnie mutagenne, wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne o toksyczności nawet 6000 razy większej aniżeli SO_2. Zalicza się do nich m.in. najpowszechniej występujący benzo(a)piren (NOCOŃ i współaut. 2007). Wspomniane związki organiczne opuszczają komorę spalania w formie gazów, par lub aerozolu związanego z cząsteczkami sadzy i popiołów. Są one produktem powstającym w warunkach, gdy nie są dotrzymywane podstawowe wymagania procesu spalania (głównie na etapie pirolizy). Często ma to miejsce podczas spalania ekogroszku, oleju opałowego lub koksu w indywidualnych kotłach rusztowych (KOBIZE 2016).

Kolejną, bardzo niebezpieczną grupą związków mogących powstawać w czasie spalania paliw są dioksyny i furany (polichlorowane dibenzodioksyny i dibenzofurany). Już w małych dawkach działają one kancerogennie i powodują uszkodzenia narządów wewnętrznych (wątroby, śledziony) (ZAKRZEWSKI 1995). Powstawanie dioksyn i furanów ma miejsce w skrajnie niekorzystnych warunkach procesu spalania: przy niedoborze tlenu, w temperaturze 400-600°C w oparach chloru (spalanie odpadów komunalnych) i przy katalitycznym działaniu popiołów zawierających związki metali.

Wśród pierwiastków śladowych przyczyniających się do zagrożeń środowiskowych

podczas spalania paliw stałych znajdują się m.in. metale ciężkie. Ze względu na specyfikę przemian w procesie spalania pierwiastki śladowe dzieli się na 3 zasadnicze grupy: (1) opuszczające komorę spalania w fazie stałej (m.in. Al, Ca, Fe), (2) ulegające odparowaniu, lecz kondensujące lub sorbowane na stałych odpadach paleniskowych (m.in. Cd, Co, Cr, Ni, Pb), (3) opuszczające kocioł w postaci par (m.in. Cl, F, Hg). Pierwsze dwie grupy związane są więc z emisją popiołów lotnych, a ich uwolnienia do otoczenia zależą głównie od zawartości w spalanym paliwie i skuteczności odpylania spalin kotłowych. Z kolei pierwiastki śladowe, występujące w stanie gazowym (m.in. rtęć), w czasie ochładzania spalin mogą przechodzić do fazy ciekłej (w wykraplanej wodzie) lub stałej (zaadsorbowane na drobinach popiołu i sadzy), i dlatego ich ewentualny wychwyt zależy także m.in. od parametrów cieplno-przepływowych panujących w trakcie spalinowym czy też składu spalin. Niezależnie od fazy skupienia większość pierwiastków śladowych stanowi zagrożenie dla zdrowia człowieka, stąd też ich emisja winna być maksymalnie ograniczana (Zakrzewski 1995, Hławiczka 2008, Kordylewski 2008).

Niezależne badania wykazały, iż procesy spalania paliw stałych generują co najmniej 28 szkodliwych związków, z czego aż 14 kancerogennych (Li i współaut. 2007). Ich akumulacja w powietrzu zewnętrznym i wewnętrznym (w budynkach) może prowadzić do takich dolegliwości jak zapalenie płuc, przewlekła choroba obturacyjna, astma, obniżenie wydolności płuc, zagrożenia ciąży, choroby układu krwionośnego, podrażnienia śluzówek (McCracken i współaut. 2012). Wdychanie dymu powstającego w paleniskach domowych przyczynia się do inhalacji cytotoksyn, hamowania naturalnych procesów regeneracji komórek, uszkodzeń płuc oraz zmian rakotwórczych (WHO 2015).

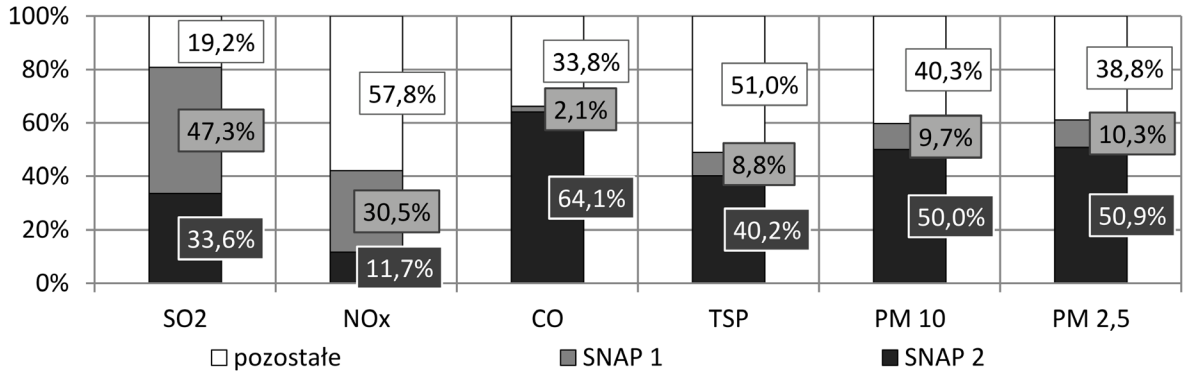
MIGRACJA ZANIECZYSZCZEŃ W EKOSYSTEMACH

Poza bezpośrednią interakcją organizmu człowieka z zanieczyszczeniami, emisje substancji toksycznych z indywidualnych systemów grzewczych przyczyniają się również do zagrożeń pośrednich, spowodowanych ich transformacjami oraz migracją w ekosystemach. Jednym ze skutków akumulacji zanieczyszczeń jest chemiczne przekształcanie gleb. Do degradacji wierzchniej warstwy litosfery przyczyniają się kwaśne deszcze (efekt imisji tlenków siarki i azotu) i opady pyłów, zawierających siarkę, fluor oraz metale ciężkie, prowadzące do zakwaszania i zubożenia w biopierwiastki (Ca, Mg, K, N). Z tego też względu jednym z kierunków ochrony gleb jest ograniczanie emisji zanieczyszczeń, także w skali lokalnej, m.in. poprzez stosowanie właściwych paliw i poprawę efektywności spalania. Nie należy zapominać także o potrzebie odpowiedniego składowania odpadów paleniskowych (żużli, popiołów), stanowiących materiały negatywnie wpływających na litosferę, hydrosferę (zanieczyszczanie wód gruntowych) i atmosferę (wtórne pylenie).

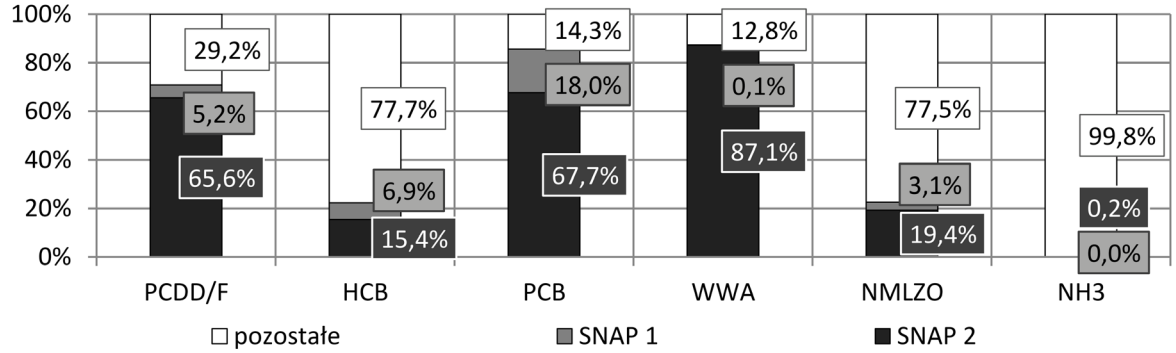
Emisja tlenków azotu i ich transformacja do azotanów i azotynów może prowadzić do eutrofizacji zbiorników wodnych i zaburzeń metabolizmu organizmów żywych. Energetyka komunalna przyczynia się niejednokrotnie do zanieczyszczenia ekosystemów wodnych metalami ciężkimi i związkami kancerogennymi. Kadm, atakujący system nerwowy, powodujący anemię, odwapnienia oraz choroby nerek i wątroby, odkłada się zwłaszcza w organizmach wodnych, natomiast ołów, hamujący procesy metaboliczne na skutek blokowania enzymów, występuje w niej głównie w postaci rozpuszczalnych soli. Oba pierwiastki związane są z emisją pyłów lotnych. Rtęć nieorganiczna uwalniana w procesach spalania, trafiając do systemów wodnych, ulega bakteriologicznym przemianom do związków organicznych (Me-Hg i pochodnych). Po wchłonięciu przez plankton organiczne związki rtęci podlegają procesom biomagnifikacji w organizmach znajdujących się na wyższych poziomach troficznych. Często preferowana dieta bogata w ryby i owoce morza, skażone związkami rtęci w wysokiej koncentracji, może prowadzić do zatrucia tym metalem. Skutki zatrucia rtęcią przejawiają się głównie w poważnych uszkodzeniach układu nerwowego (parestezje, utrata koordynacji ruchowej, choroby psychiczne, upośledzenie płodu ludzkiego). Nagłośnionymi przykładami tragicznych skutków zdrowotnych związanych ze skażeniem lokalnego środowiska związkami rtęci są przypadki z Japonii z Minamaty (lata 50. XX w.) i z Niigaty (1965).

EMISJE ZANIECZYSZCZEŃ Z SEKTORA KOMUNALNO-BYTOWEGO

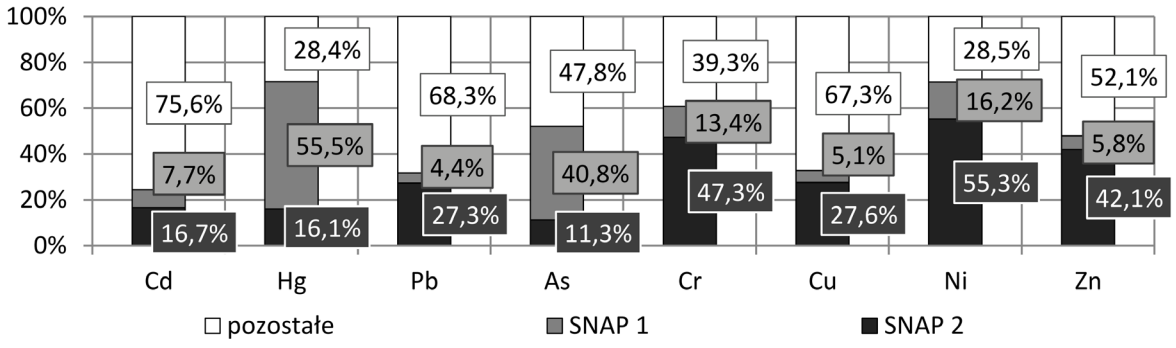
O wpływie różnych sektorów gospodarki krajowej na wielkość emisji zanieczyszczeń do środowiska można dowiedzieć się z lektury krajowych prac inwentaryzacyjnych wykonanych zgodnie z postanowieniami międzynarodowych organów ochrony środowiska (m.in. Unii Europejskiej i Konwencji, LRTAP). Do porównania wpływu energetyki zawodowej i komunalnej na stan środowiska naturalnego wykorzystano raport Kobize (2015), który pozwolił na określenie ich



Ryc. 1. Krajowa emisja tlenków siarki i azotu, tlenku węgla oraz popiołów lotnych według kategorii SNAP (wg KOBIZE 2015).



Ryc. 2. Krajowa emisja dioksyn i furanów, HCB, PCB, WWA, NMLZO i amoniaku wg kategorii SNAP (wg KOBIZE 2015).



Ryc. 3. Krajowa emisja najważniejszych metali ciężkich według kategorii SNAP (wg KOBIZE 2015).

udziału w emisjach procesów spalania w sektorze produkcji i transformacji energii (kod SNAP 1) i procesów spalania poza przemysłem (SNAP 2) w Polsce w 2013 r. Porównanie ilości wprowadzanych do atmosfery poszczególnych zanieczyszczeń z obu źródeł zamieszczono na rycinach 1–3. Na rycinie 1 przedstawiono krajową emisję antropogeniczną 6 rodzajów zanieczyszczeń: tlenków kwasowych (SO_2 i NO_x), CO oraz popiołów lotnych (TSP – całkowitego pyłu zawieszonego, rozumianego jako wszystkie ziarna popiołów o średnicy poniżej 300 μm). Z zestawienia wynika, iż polski sektor komunalno-bytowy

Tabela 1. Zużycie bezpośrednie energii pierwotnej i pochodnej w gospodarstwach domowych w Polsce w 2014 roku na tle zużycia krajowego (wg GUS 2015).

Źródło energii pierwotnej lub pochodnej	Konsumpcja krajowa	Jednostka	% zużycia krajowego	Pokrycie potrzeb gospodarstw, %
węgiel kamienny energetyczny	61008	tys. ton	16,23	32,4
węgiel brunatny	63846	tys. ton	0,63	0,4
gaz ziemny wysokometanowy	14484	mln m^3	23,92	15,7
gaz ziemny zaazotowany	3864	mln m^3	6,86	0,9
torf i drewno	20913	tys. m^3	53,08	13,3
koks i półkoks	3237	tys. ton	5,25	0,6
gaz ciekły (LPG)	2358	tys. ton	20,78	2,9
oleje opałowe	729	tys. ton	9,60	0,4
energia elektryczna	161	TWh	17,44	12,7
ciepło sieciowe	278593	TJ	58,51	20,5

(kojarzony z sekcją SNAP 2) odpowiada za blisko 34% krajowej emisji tlenków siarki (liczbowo odpowiadającej 71% SO_2 wyprowadzanego do otoczenia w ramach działalności energetyki zawodowej), 11,7% emisji tlenków azotu (przy 30,5% udziale SNAP 1 oraz aż 32,0% transportu drogowego SNAP 7), blisko 64% tlenku węgla (przy jedynie 2,1% w przypadku całej energetyki zawodowej) oraz 40% wszystkich pyłów (w tym za około połowę mikronowych, 4,5-krotnie więcej niż SNAP 1).

Na kolejnym zestawieniu (Ryc. 2) przedstawiono krajowe struktury emisji dioksyn i furanów (PCDD/F), heksachlorobenzenu (HCB), polichlorowanych bifenyli (PCB), wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA), niemetanowych lotnych związków organicznych (NMLZO) i amoniaku. Sektor komunalno-bytowy należy do grupy dominującej, jeśli chodzi o wprowadzanie do otoczenia dioksyn i furanów (65,6% szacowanej emisji krajowej), PCB (67,7%) oraz WWA (aż 87,1%). W mniejszym stopniu odpowiada za źródło heksachlorobenzenu HCB (ponad 15% emisji krajowej) i NMLZO (blisko 20%). W przypadku energetyki zawodowej, udziały wspomnianych związków nie przekraczają 7% (jedynie dla PCB odnotowano 18%).

W przypadku emisji metali ciężkich (Ryc. 3) procesy spalania w gospodarstwach domowych stanowią istotne źródło (20-60% krajowej emisji) uwolnień takich pierwiastków jak nikiel, ołów, chrom, miedź i cynk. Jedynie w przypadku rtęci i arsenu przewyższa je działalność energetyki zawodowej oraz źródeł energetycznych w przemyśle.

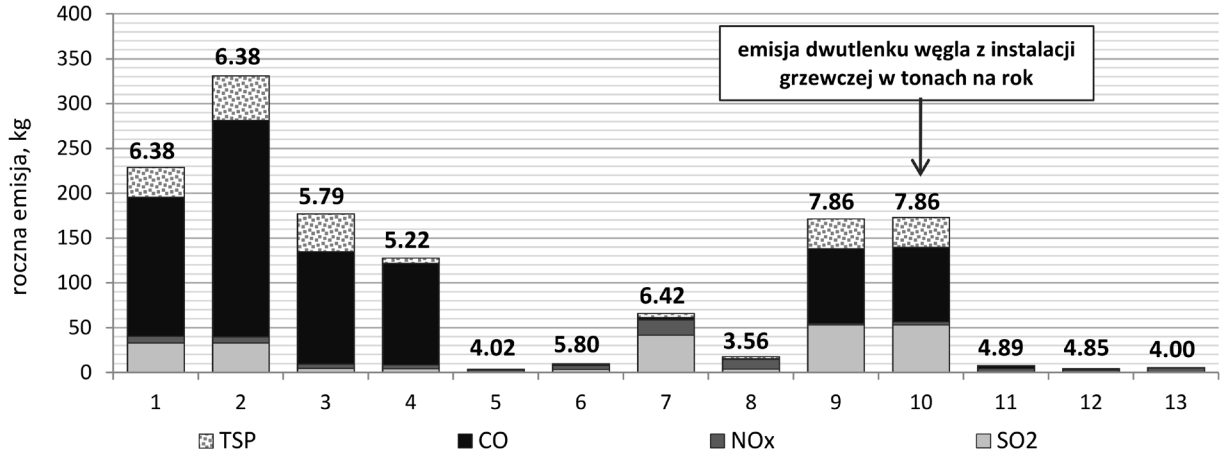
Należy także podkreślić, iż ze względu na postępujące wdrażanie bardziej restrykcyjnych norm środowiskowych w odniesieniu do dużych bloków energetycznych (w ramach postanowień Dyrektywy 2010/75/UE), w kolejnych latach spodziewać się należy wyraźnego spadku emisji NO_X, SO_2 i popiołów w sektorze SNAP 1. Zwiększy to więc już i tak dość znaczny udział działalności SNAP 2 w emisjach wielu grup zanieczyszczeń.

W Tabeli 1 przedstawiono zużycie poszczególnych nośników energii (pierwotnej i pochodnej) wykorzystywanych w indywidualnych gospodarstwach domowych w 2014 r. w Polsce oraz określono udział sektora komunalno-bytowego w krajowym zużyciu danej formy energii.

Jak widać z powyższych danych, pomimo wyraźnej różnicy w ilości wykorzystywanych paliw (węgla, gazu ziemnego), co może sugerować wyższe emisje z energetyki zawodowej, to jednak emisje z instalacji energetycznych w sektorze komunalno-bytowym stwarzają o wiele większe zagrożenia dla środowiska.

EMISJA ZANIECZYSZCZEŃ Z POJEDYNCZEGO GOSPODARSTWA DOMOWEGO

Wybór technologii spalania oraz rodzaju paliwa zasadniczo wpływają na emisję poszczególnych zanieczyszczeń. W celu porównania ilości wprowadzanych do otoczenia



Ryc. 4. Roczne emisje wybranych zanieczyszczeń z gospodarstwa domowego w zależności od paliwa stosowanego na cele grzewcze (CHOLEWIŃSKI i KAMIŃSKI 2016).
1 ekogroszek (ciąg naturalny), 2 ekogroszek (ciąg wymuszony), 3 pellety zbożowe, 4 pellety z drewna, 5 gaz sieciowy typu E, 6 lekki olej opałowy (L-1), 7 ciężki olej opałowy (C-1), 8 opałowy olej napędowy, 9 koks (ciąg naturalny), 10 koks (ciąg wymuszony), 11 propan, 12 LPG, 13 oczyszczony biogaz; TSP – całkowity pył zawieszony (cząstki popiołów lotnych o średnicy mniejszej niż 300 μm), CO – tlenek węgla, NOx – tlenki azotu, SO_2 – dwutlenek siarki

zanieczyszczeń z różnych układów energetycznych, związanych z działalnością ciepłowniczą w małej skali, dokonano przeliczenia uzyskiwanych wielkości na tzw. emisję równoważną, związaną z pokryciem rocznego zapotrzebowania na ciepło modelowego gospodarstwa domowego (o powierzchni użytkowej 135 m^2). Na Ryc. 4 przedstawiono wyniki takiej symulacji, uwzględniając emisje 5 podstawowych zanieczyszczeń powstających w procesie spalania różnych paliw (CHOLEWIŃSKI i KAMIŃSKI 2016). Wartości te odnoszą się do wpływu na środowisko naturalne indywidualnego systemu grzewczego, zasilającego układ centralnego ogrzewania (35,5 GJ) i produkcji ciepłej wody użytkowej (16,8 GJ) przy wykorzystaniu różnych paliw. Po uwzględnieniu sprawności konwersji energii chemicznej zawartej w paliwach na energię użytkową (ciepło) oraz ich kaloryczności, określana była niezbędna do spalenia ilość danego paliwa w skali roku. Następnie, znając obowiązujące wskaźniki emisji i przyjmując m.in. zawartości związków siarki czy też substancji mineralnej w wykorzystywanym nośniku energii (zgodnie z polskimi normami), obliczano strumień danego zanieczyszczenia opuszczający palenisko w skali roku. Porównując sumaryczne poziomy emisji zanieczyszczeń takich jak: popioły lotne, tlenek węgla, tlenki azotu i dwutlenek siarki, za najmniej ekologiczne rozwiązania uznać należy, w kolejności: ekogroszek (ponad 200 kg zanieczyszczeń na rok), koks (ok. 170 kg/rok), biomasę stałą (100–170 kg/rok) oraz ciężki olej opałowy (blisko 70 kg/rok). Poniżej 20 kg na rok zanieczyszczeń wyemitują z kolei układy zasilane gazem sieciowym typu E, lekkim olejem opałowym, olejem napędowym dla ogrzewnictwa, gazami ciekłymi lub oczyszczonym biogazem. O ile o emisji CO_2 zasadniczo decyduje kaloryczność paliwa i sprawność konwersji chemicznej paliwa w ciepło użytkowe, o tyle o uwolnienia związków siarki, azotu, pyłów o wymiarach mniejszych od 300 mikrometrów (TSP) czy też CO wskazują na sprawność procesu spalania i skład paliwa (zawartość substancji mineralnej, siarki, azotu). W celu ograniczania negatywnego wpływu procesów generacji ciepła w sektorze komunalno-bytowym, poza rozpatrywanymi: wzrostem sprawności spalania i zamianą paliwa (zmianą struktury nośników energii pierwotnej), istotne stają się działania takie jak: (i) termomodernizacja budynku (zmniejszenie zużycia paliw na cele grzewcze), (ii) racjonalne użytkowanie przestrzeni mieszkalnej (ograniczanie straty ciepła), (iii) stosowanie technologii z zakresu budownictwa pasywnego (rekuperacja ciepła, regulacja nasłonecznienia), (iv) wykorzystywanie paliw podlegających uprzedniej waloryzacji (wzbogacanie i uszlachetnianie węgla, dodatki) oraz technologii oczyszczania spalin kotłowych, (v) stosowanie odnawialnych źródeł energii (OŹE) (kolektorów słonecznych, pomp ciepła, instalacji geotermalnych) i innowacyjnych technologii energetycznych, np. spalania wspomaganego katalizatorem, co pozwala na obniżenie temperatury procesu, a tym samym obniżenie emisji m.in. tlenków azotu (KORDYLEWSKI 2008) czy też tzw. instalacji wodorowych, układów do produkcji i bezpło-

mieniowego spalania wodoru, wyposażonych w odwracalne ogniwa paliwowe (CHOLEWIŃSKI i TOMKÓW 2015).

PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono oraz porównano emisje zanieczyszczeń związane z działalnością w Polsce dwóch sektorów: energetyki zawodowej i indywidualnego ogrzewnictwa, a także ich wpływ na zdrowie mieszkańców. Wykazano, iż pomimo znacznie mniejszego zużycia paliw w sektorze energetyki zawodowej skupiającej duże bloki energetyczne, to właśnie kotły małej mocy są dominującymi źródłami emisji tlenku węgla, popiołów lotnych, dioksyn i furanów oraz wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych. Ma to związek przede wszystkim ze strukturą paliwową sektora komunalno-bytowego (węgiel, koks, biomasa), a w wielu przypadkach niskim stanem technicznym indywidualnych palenisk i niedostateczną kontrolą procesu spalania. Zanieczyszczenia emitowane z takich instalacji grzewczych stanowią zarówno bezpośrednie, jak i pośrednie zagrożenie dla zdrowia i życia ludzi. Emitowane z sektora komunalno-bytowego pyły zawieszone, sadza, metale ciężkie i związki organiczne stanowią częstą przyczynę chorób układu oddechowego, układu krążenia, mogą również wywoływać ataki astmy. Jak wykazały badania, celowe staje się wsparcie nowoczesnych technologii i spalanie paliw „czystych", umożliwiających zaspokojenie zmiennego popytu na ciepło bez towarzyszącej nadmiernej emisji szkodliwych zanieczyszczeń. Poza układami OŹE i kogeneracją systemową, w przypadku indywidualnych układów grzewczych celowe staje się spalanie gazu ziemnego, automatyzacja procesu spalania, instalowanie układów ochrony atmosfery oraz odwrót od negatywnych zachowań konsumenckich (spalania śmieci, zaniedbywanie kontroli pracy kotła lub pieca). W przyszłości sektor komunalny powinien wykorzystywać ogniwa paliwowe, w tym także te odwracalne w ramach tzw. gospodarstw wodorowych (SURYGAŁA 2008) i układy energetyczne zasilane przez odnawialne źródła energii.

STRESZCZENIE

Procesom generacji ciepła użytkowego w indywidualnych systemach grzewczych towarzyszy emisja szeregu związków stanowiących bezpośrednie lub pośrednie zagrożenie dla zdrowia i życia ludzi. Ze względu na brak odpowiednich instalacji ochrony atmosfery oraz norm środowiskowych, specyficznych dla działania dużych, zawodowych bloków energetycznych, uwalniane w paleniskach domowych zanieczyszczenia praktycznie w całości wyprowadzane są do otoczenia. W pracy porównano poziomy rocznych emisji wybranych grup związków towarzyszących działaniu indywidualnego systemu grzewczego w zależności od rodzaju stosowanego paliwa, przedstawiono także specyfikę powstawania ważniejszych toksyn, ich wpływ na zdrowie człowieka oraz możliwości ograniczenia związanej z nimi tzw. niskiej emisji. Wykazano także, iż procesy spalania poza przemysłem stanową około 34% krajowej emisji SO_2, 12% NO_x, 64% CO, 40% pyłów, 87% wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych, 66% dioksyn i furanów, 19% niemetanowych lotnych związków organicznych oraz do 55% różnych metali ciężkich (w tym 47% Cr, 55% Ni i 42% Zn), potwierdzając dominujący wpływ energetyki komunalnej i ogrzewnictwa indywidualnego na emisję substancji niebezpiecznych dla zdrowia i życia człowieka.

LITERATURA

BOCKHORN H., 1994. *Soot Formation in Combustion: Mechanisms and Models*. Springer-Verlag Berlin Heidenlberg.

CHOLEWIŃSKI M., TOMKÓW Ł., 2015. *Instalacje wodorowe szansą na niezależność energetyczną gospodarstwa domowego*. Energetyka dla budownictwa – spojrzenie młodych naukowców Creativetime, Kraków, 143-150.

CHOLEWIŃSKI M., KAMIŃSKI M., 2016. *The infuence of the type of fuel used in individual heating systems on the emissions of various pollutants and the quality of local environment*. II Int. Conf. „Human Ecology", Szczecin, 9-10.06.2016. Wyd. Uczel. Zachodniopom. Uniw. Technol. w Szczecinie, Szczecin, 42-43.

GINARSKI Z., 2015. *Efektywne gospodarowanie energią w gospodarstwach rolnych. Przechodzenie na gospodarkę niskoemisyjną*. Centrum Doradztwa Rolniczego w Brwinowie Oddział w Radomiu, Radom.

GUS, 2015. *Gospodarka paliwowo-energetyczna w latach 2013 i 2014. Informacje i opracowania statystyczne*. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa.

HŁAWICZKA S., 2008. *Metale ciężkie w środowisku*. Instytut Ekologii Terenów Uprzemysłowionych. Wyd. Ekonomia i Środowisko, Białystok.

JAROSIŃSKI J., 1996. *Techniki czystego spalania*. Wyd. Nauk.-Techn. Warszawa.

KARAGULIAN F., BELIS C. A., DORA C. F. C., PRÜSS-USTÜNB A. M., BONJOUR S., ADAIR-ROHANIB H., AMANN M., 2015. *Contributions to cities' ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level*. Atm. Environ. 120, 475-483.

KOBIZE, 2015. *Krajowy bilans emisji SO_2, NO_x, CO, NH_4, NMLZO, pyłów, metali ciężkich i TZO w układzie klasyfikacji SNAP i NFR*. Raport podstawowy. Warszawa.

KORDYLEWSKI W., 2008. *Spalanie i paliwa*. Ofic. Wyd. Polit. Wrocł. Wrocław.

LACHMAN P., 2015. *Przyczyny przekroczeń emisji zanieczyszczeń*. Czysta energia 12, 26-29.

LI X. , DUAN L., WANG S., DUAN J., GUO X., YI H., HU J., LI C., HAO J. 2007. *Emission characteristics of particulate matter from rural household biofuel combustion in China*. Energy Fuels 21, 845-851.

MCCRACKEN J. P., WELLENIUS G. A., BLOOMFIELD G. S., BROOK R. D., TOLUNAY H. E., DOCKERY D. W. i współaut., 2012. *Household air pollution from solid fuel use: evidence for links to CVD*. Global Heart 7, 223-234.

MEIJ R., 1997. *Behaviour, control and emissions of trace species by coal-fired power plants in Europe*. Raport No. 58087-KST/MAT 97-6546, Arnhem, Netherlands.

NIK, 2014. *Informacja o wynikach kontroli „Ochrona powietrza przed zanieczyszczeniami”.* Najwyższa Izba Kontroli Warszawa.
NOCOŃ J., POZNAŃSKI J., SŁUPEK S., RYWOTYCKI M., 2007. *Technika cieplna. Przykłady z techniki procesów spalania.* Uczel. Wyd. Nauk.-Dydakt. AGH Kraków.
RYBAK W., 2006. *Spalanie i współspalanie biopaliw stałych.* Ofic. Wyd. Polit. Wrocł. Wrocław.
SURYGAŁA J., 2008. *Wodór jako paliwo.* Wyd. Nauk.-Techn. Warszawa.
WILK R. K., 2001. *Laboratorium techniki spalania.* Wyd. Polit. Śląskiej Gliwice.
WHO, 2015. *Residential heating with wood and coal: health impacts and policy options in Europe and North America.* World Health Organization Regional Office for Europe.
WHO, 2016. *WHO's Global Urban Ambient Air Pollution Database.* Update 2016. http://www.who.int/phe/health_topics/en/ (dostęp 07.08.2016).
ZAKRZEWSKI S. F., 1995. *Podstawy toksykologii środowiska.* PWN Warszawa.
ZWOŹDZIAK J., ZWOŹDZIAK A., SZCZUREK A., 1998. *Meteorologia w ochronie atmosfery.* Ofic. Wyd. Polit. Wrocł. Wrocław.

KOSMOS Vol. 65, 4, 477–486, 2016

MACIEJ CHOLEWIŃSKI[1], MICHAŁ KAMIŃSKI[2], WOJCIECH POSPOLITA[3]

[1]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, [2]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, [3]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; e-mail: maciej.cholewinski@pwr.edu.pl

THREATS TO HUMAN HEALTH AND LIFE FROM THE USE OF SELECTED FUELS IN INDIVIDUAL HEATING SYSTEMS

Summary

Combustion processes, involving different types of fuels, and related emissions of various pollutants have significant impact on the quality of environment. Due to the multitude of physicochemical phenomena, they may unfavorably affect health of the man both directly and indirectly. Because of the lack of high efficiency air protection equipment and adequate environmental standards (both widely applied in commercial power plants), the releases of toxic substances from small furnaces in domestic use are nearly entirely introduced to the atmosphere. In this paper the annual emissions of selected pollutants (TSP, CO_2, CO, NO_x and SO_2) from individual heating systems fueled with different fuels are compared and discussed. Moreover, mechanisms of creation of main pollutants, their effects on human health and major household air pollution reduction technologies are analysed as well. As evidenced by introduced assessments, non-industrial stationary combustions in Poland are responsible for about 34% of SO_2 emission, 12% of NO_x, 64% of CO, 40% of total particulate matter, 66% of dioxins and furans, 87% of polycyclic aromatic hydrocarbons, 19% of non-methane volatile organic compounds and even 55% of different heavy metals (including 47% of chromium, 55% of nickel and 42% of zinc). For this reason, combustion processes in individual heating systems and local power units became a major source of several toxic substances in this country.