

MODELOWANIE ROZPRZESTRZENIANIA SIĘ ZANIECZYSZCZEŃ EMITOWANYCH Z EMITORÓW PUNKTOWYCH

Monika Wierzbńska¹

¹ Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Instytut Ochrony i Inżynierii Środowiska, ul. Willowa 2, 43-300 Bielsko-Biała, e-mail: mwierzbinska@ath.bielsko.pl

STRESZCZENIE

W artykule zaprezentowano wyniki modelowania parametrów i czynników determinujących rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym. Do parametrów tych należą: aerodynamiczny współczynnik szorstkości terenu, rozmieszczenie emitorów w terenie, temperatura oraz prędkość wylotowa spalin na wylocie z emitora. Korzystając z map wygenerowanych przez program Ek100w przeprowadzono analizę rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń pyłowych emitowanych z emitorów o różnych parametrach roboczych. Z danych wynika, że wymienione parametry mają znaczny wpływ na rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń w atmosferze. Dostępne narzędzia pozwalają zaś na projektowanie emisji w praktyce, a tym samym maksymalne ograniczanie emisji zanieczyszczeń na terenach szczególnie narażonych na emisję przemysłową.

Słowa kluczowe: rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń, punktowe źródła emisji, model Pasquilla

MODELING OF AIR POLLUTION DISPERSION EMITTED FROM POINT SOURCES

ABSTRACT

In this paper, the modeling results of parameters and factors which determine spread of contamination in atmospheric air, are presented. These factors are: aerodynamic coefficient of area roughness, emitters location, exhaust temperature and velocity at the end of emitter. Computer program Ek100w calculates concentration of pollutants in the air on different distance from the emitter. We use calculation results to prepare charts with contour lines of air pollutions concentration. In this article contamination spread from emitters with different work parameters is analyzed. It follows that these parameters and factors have an important effect on contamination spreading in the atmospheric air. We can use such programs for emission design in practice and reduce impurities and immission on area where people are especially endanger for industrial emission.

Keywords: air pollution dispersion, point emission sources, Pasquill's model

WSTĘP

Istotą ochrony powietrza jest zapewnienie jak najlepszej jego jakości. Podstawą działań zmierzających w tym kierunku są metody pierwotne, czyli zapobieganie powstawaniu zanieczyszczeń pyłowych i gazowych m.in. poprzez wzbogacanie paliw oraz stosowanie tak zwanych czystych technologii. Kolejną drogą w kierunku ograniczania emisji zanieczyszczeń do powietrza są metody wtórne, stosowane na etapie emisji gazów odlotowych. Odpowiednie akty prawne określają dopuszczalne ilości zanieczyszczeń, które podmioty mogą wyemitować w jednostce czasu oraz

poziomy dopuszczalne dla wybranych substancji w powietrzu, czyli ich ilości w jednostce objętości powietrza dla danego terenu. Ważną składową kompleksowej ochrony powietrza jest monitoring emisji zanieczyszczeń w powietrzu na określonym terenie. Jednym z narzędzi służących do wykonania pełnej analizy stanu zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego spowodowanego emisją zanieczyszczeń z zespołu emitorów jest program Ek100w Firmy Atmoterm. Obliczenia prowadzone są w oparciu o model Pasquilla, rekomendowany w Polsce jako model do obliczania wpływu emisji z obiektów przemysłowych na stan powietrza atmosferycznego.

EMISJA I IMISJA

Zgodnie z ustawą z dnia 27 kwietnia 2001 r. *Prawo ochrony środowiska* poprzez emisję określa się wprowadzanie bezpośrednio lub pośrednio, w wyniku działalności człowieka do powietrza, wody, gleby lub ziemi: substancji stałych, ciekłych lub gazowych bądź energii takich jak ciepło, hałas, wibracje lub pola elektromagnetyczne [Juda-Rezler, 2000]. Emisję określa się w następujących jednostkach: mg/s, kg/h oraz Mg/rok. Emisja to nic innego jak ilość zanieczyszczeń wprowadzonych do powietrza atmosferycznego w określonym czasie.

Imisja jest ilością zanieczyszczeń pyłowych lub gazowych odbieraną przez środowisko. Jest miarą stopnia jego zanieczyszczenia, definiowaną jako stężenie zanieczyszczeń w powietrzu (wyrażana jest w jednostkach masy danego zanieczyszczenia na jednostkę objętości powietrza- $\mu\text{g}/\text{m}^3$ lub ppm, ppb). Ocena poziomu substancji w powietrzu dokonywana jest poprzez porównanie ich z dopuszczalnymi wartościami stężeń tych substancji w powietrzu [Dz.U. nr 62, poz. 627].

Określanie emitowanych do powietrza zanieczyszczeń jest wymogiem Prawa ochrony środowiska. Rozporządzenia Ministra Środowiska regulują normy dla wybranych substancji zanieczyszczających w gazach odlotowych dla wielu procesów technologicznych.

CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA ROZPRZESTRZENIANIE SIĘ ZANIECZYSZCZEŃ W POWIETRZU

Ruch gazowych i stałych zanieczyszczeń, odbywający się w dużych masach powietrza atmosferycznego, nosi nazwę rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w atmosferze. W wyniku rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń zachodzi zmiana w czasie i przestrzeni stanu i jakości atmosfery. Rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń w pobliżu źródeł ich emisji prowadzi do zwiększenia imisji, czyli zwiększenia stężeń substancji zanieczyszczających w okolicznym powietrzu. Smuga zanieczyszczeń opuszczająca emitor, w trakcie przemieszczania się podlega złożonym procesom, na które zasadniczy wpływ mają czynniki topograficzne oraz meteorologiczne [Markiewicz 2004].

Czynniki topograficzne

Na rozchodzenie się zanieczyszczeń w powietrzu, wpływ bezpośredni jak i pośredni mają uwarunkowania topograficzne, takie jak: ukształtowanie terenu, rodzaj pokrycia i sposoby użytkowania terenu.

Bezpośredni wpływ określony jest parametrem aerodynamicznej szorstkości terenu z_0 (tab. 1). Oddziaływanie to polega na powstawa-

Tabela 1. Wartości współczynnika aerodynamicznej szorstkości terenu [Rozporządzenie...2010]

Tabela 1. Aerodynamic coefficient of area roughness value [Rozporządzenie...2010]

Lp.	Typ pokrycia terenu	Współczynnik z_0 [m]
1	Woda	0,00008
2	Łąki, pastwiska	0,02
3	Pola uprawne	0,035
4	Sady, zarośla, zagajniki	0,4
5	Lasy	2,0
6	Zwarta zabudowa wiejska	0,5
7	miasto do 10 tys. mieszkańców	1,0
8	Miasto 10–100 tys. mieszkańców	
8.1	- zabudowa niska	0,5
8.2	- zabudowa średnia	2,0
9	Miasto 100–500 tys. mieszkańców	
9.1	- zabudowa niska	0,5
9.2	- zabudowa średnia	2,0
9.3	- zabudowa wysoka	3,0
10	Miasto powyżej 500 tys. mieszkańców	
10.1	- zabudowa niska	0,5
10.2	- zabudowa średnia	2,0
10.3	- zabudowa wysoka	5,0

niu regionalnych zakłóceń prędkości i kierunku wiatru w wyniku napotkania smugi na przeszkody terenowe tj. zbiorniki wodne, niewielkie wzgórza, skarpy, łąki, czy pastwiska, zagajniki, lasy, zabudowę jednorodziną czy na wysoką zabudowę miejską (rys. 1–2) Takie zawirowania znacząco decydują o dobrym lub gorszym przewietrzaniu danego terenu, a co za tym idzie do usuwania lub kumulowania zanieczyszczeń na danym obszarze [Markiewicz 2004, Mazur 2004].

Na rysunku 1 i 2 zobrazowano zmiany kierunku rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń emitowanych z komina pod wpływem zmian topografii terenu.

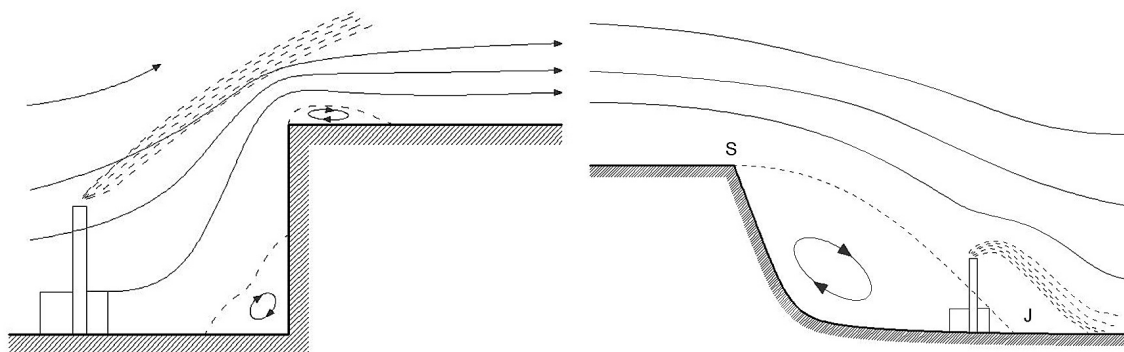
Czynniki meteorologiczne

Czynniki meteorologiczne mają wpływ nie tylko na rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń lecz również na wielkość ich stężeń. Można do nich zaliczyć: prędkość i kierunek wiatru, dyfuzję atmosferyczną, turbulencję atmosfery, pionowy

gradient temperatur, grubość warstwy mieszania, opady atmosferyczne jak również przemiany chemiczne w powietrzu [Markiewicz 2004, Mazur 2004, Zwoździak et al. 1998].

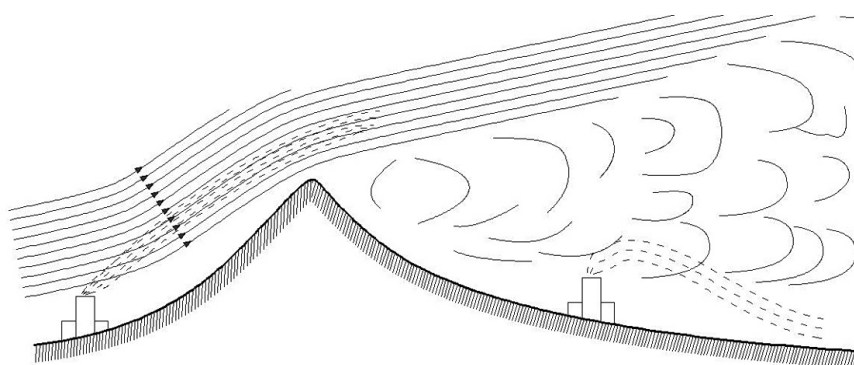
Parametry opisujące poziomy ruch mas powietrza: kierunek i prędkość wiatru, mają decydującą rolę w procesie rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń. Wiatr porywa cząsteczki zanieczyszczeń i transportuje je z nad obszaru emisyjnego na duże odległości. Kierunek wiatru określa trasę ich rozchodzenia się. Prędkość natomiast wpływa na tempo przemieszczania się smugi w atmosferze. Wraz ze wzrostem prędkości wiatru zwiększa się stopień rozpraszania smugi, a więc zmniejsza się poziom emisji. Jednocześnie sprzyja to również transportowaniu zanieczyszczeń na znacznie większe odległości, co wiąże się z powiększeniem zasięgu ich oddziaływania [Markiewicz 2004, Mazur 2004, Zwoździak et al. 1998].

Opady atmosferyczne oraz chmury mogą absorbować zanieczyszczenia, co prowadzi do usunięcia ich z powietrza. Jest to moż-



Rys. 1. Schemat wpływu skarpy na rozprzestrzenianie się smugi dymu emitowanego od strony zawietrznej (A) i nawietrznej (B) skarpy [Juda et al. 1974]

Fig. 1. Scarp effect on waste gases spreading lee side (A) and weather side (B) of scarp [Juda et al. 1974]



Rys. 2. Schemat wpływu wzgórza na rozprzestrzenianie się smugi dymu [Juda et al. 1974]

Fig. 2. Hill effect on waste gases spreading [Juda et al. 1974]

liwe szczególnie, jeśli mamy do czynienia z zanieczyszczeniami pyłowymi. Efektywność tego zjawiska zależy od intensywności opadów i wielkości cząstek, im większe rozmiary cząstek tym wymywanie jest skuteczniejsze. Na procesy chemiczne zachodzące w atmosferze duży wpływ ma temperatura powietrza, nasłonecznienie i wilgotność [Markiewicz 2004].

Na rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń w atmosferze mają również wpływ parametry emitorów, ich rozmieszczenie w terenie oraz parametry spalin.

METODYKA ANALIZY ROZPRZESTRZENIANIA SIĘ ZANIECZYSZCZEŃ W POWIETRZU

Analizę rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w powietrzu przeprowadzono obliczając stężenia pyłu zawieszonego PM10 w atmosferze w różnych odległościach od emitora. Wykorzystano jako narzędzie program Ek100w firmy Atmoterm, który umożliwił graficzne przedstawienie wyników w postaci izolinii na mapach. Program oparty jest na modelu Pasquilla, rekomendowanego przez Ministerstwo Środowiska [Rozporządzenie... 2010]

Równanie Pasquilla jest rozwiązaniem uproszczonego równania różniczkowego dyfuzji zanieczyszczeń w poruszającym się ośrodku gazowym. Ma ono zastosowanie w przypadku źródeł punktowych, ustalonych w czasie np. kominy, wywiewniki, wyrzutnie wentylacyjne. Wynikiem rozwiązania równania Pasquilla jest stężenie zanieczyszczenia w każdym punkcie obszaru obliczeniowego [Michalczyk 2003].

Wpływ na wartość użytkową formuły ma dokładność, z którą określono parametry występujące w równaniu. W sposób doświadczalny wyznacza się średnią prędkość wiatru oraz wartość współczynników dyfuzji, co pozwala na uzyskanie jak najlepszej zgodności pomiędzy rozwiązaniem teoretycznym, a wynikami pomiarów na danym obszarze. Ze względu na liczne uproszczenia stosowane w formule nie uwzględnia się m.in. absorpcji smugi przez podłoże, przemian chemicznych zanieczyszczeń oraz zjawiska grawitacyjnego opadania [Michalczyk 2003]. Poprawność wyniku modelu rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń z wykorzystaniem formuły Pasquilla zależy od wpływu stanów atmosfery, jak również czynników meteorologicznych

i topograficznych terenu [Markiewicz 2004, Michalczyk 2003].

Program Ek100w firmy Atmoterm S.A. jest uniwersalnym narzędziem umożliwiającym przeprowadzenie analizy rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym, emitowanych z pojedynczych emitorów, bądź zespołu emitorów punktowych, liniowych, czy powierzchniowych [Instrukcja... 2007].

Metodyka obliczeń opiera się na metodyce modelowania określonej w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 26 stycznia 2010 r. w sprawie wartości odniesienia dla niektórych substancji w powietrzu [Rozporządzenie... 2010].

Obliczenia przeprowadzono dla parametrów zamieszczonych w tabeli 2. Założono, że emitor jest emitorem punktowym otwartym o wysokości 10 m i średnicy wewnętrznej 1 m. Czynnikiem, które podlegały modelowaniu był współczynnik aerodynamicznej szorstkości terenu, prędkość spalin na wylocie z emitora, temperatura spalin w momencie emisji do atmosfery oraz rozmieszczenie emitorów w terenie względem kierunku najczęściej wiejącego wiatru. W tym przypadku do obliczeń przyjęto trzy emitory o jednakowych parametrach, podanych w tabeli 2. Emitory te zlokalizowano wzdłuż linii równoległej do kierunku najczęściej wiejących wiatrów oraz linii prostopadłej. Wykonano także modelowanie dla emitorów usytuowanych blisko jak i daleko od siebie, co również determinuje jakość powietrza na terenie objętym obliczeniami. Otrzymane wyniki w postaci tabelarycznych zestawień stężeń pyłu we wszystkich punktach siatki obliczeniowej zwizualizowano na mapach izolinii stężeń na obliczanym obszarze. Następnie przeprowadzono

Tabela 2. Zestawienie danych do obliczeń

Table 2. Analytical data statement

Parametr	Jednostka	Wprowadzana wartość
Wysokość emitora	[m]	10
Średnica wewnętrzna emitora	[m]	1
Średnia temperatura otoczenia	[°C]	8
Czas emisji w ciągu roku	[h]	6000
Współczynnik aerodynamicznej szorstkości terenu	[m]	0,5
Emisja pyłu PM10	[kg/h]	1
Temperatura spalin	[K]	400
Prędkość wylotowa spalin	[m/s]	5
Wysokość siatki obliczeniowej	[m]	0

analizę zmian rozkładu izolinii w przypadkach, w których wykorzystano różne dane dla tych samych parametrów. Analizę przeprowadzono dla współczynnika aerodynamicznej szorstkości terenu, charakterystycznego dla terenów pokrytych łąkami i pastwiskami ($z_0 = 0,002$ m) oraz współczynnika określonego dla zabudowy wysokiej miast liczących powyżej 500 tys. mieszkańców ($z_0 = 5$ m). Ponadto przeprowadzono również modelowanie rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń dla dwóch różnych prędkości wylotowych spalin (1 i 10 m/s) oraz różnych wartości temperatur spalin na wylocie z emitora (400 i 600 K).

WYNIKI

Wprowadzenie danych do programu Ek100w umożliwiło obliczenie stężeń pyłu PM10 w atmosferze w promieniu ok. 500 metrów od emitora punkowego otwartego, czyli do odległości wynoszącej pięćdziesięciokrotną wysokość emitora ($50 \times h$), jak zakłada to metodyka referencyjna [Rozporządzenie...2010]. Wyniki zwizualizowano w postaci rozkładu izolinii stężeń na mapach przedstawionych na rysunkach 3–12. Na mapach zamieszczono obszary, na których imisja była najwyższa, tzn. że nie wszystkie rysunki przedstawiają całkowite obszary obliczeniowe $50 \times h$.

Na rysunkach 3 i 4 zobrazowano sposób rozprzestrzeniania się pyłu PM10 w atmosferze, emitowanego przez emitor o wysokości 10 metrów, na terenie o współczynnikach aerodynamicznej szorstkości terenu z_0 wynoszących 0,02 m oraz 5 m.

Rysunki 5 i 6 przedstawiają sposób rozchodzenia się zapyłonego dymu z tego samego emitora przy różnych prędkościach wylotowych spalin ($v = 1$ m/s oraz 10 m/s).

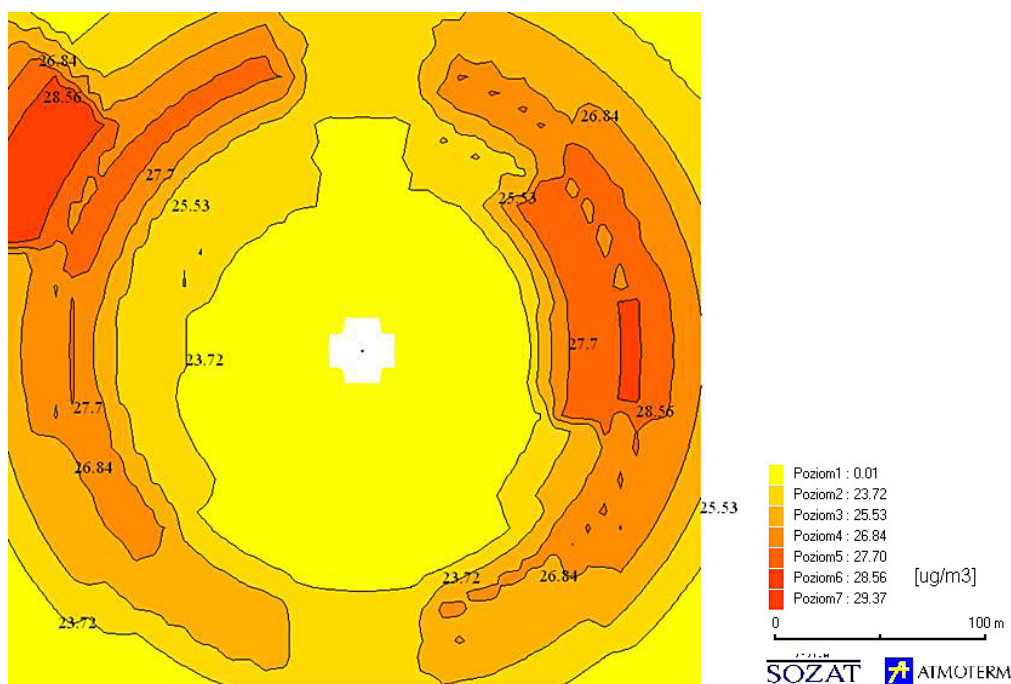
Na rysunkach 7 i 8 można zaobserwować, jakie są różnice w imisji zanieczyszczeń przy różnych temperaturach spalin na wylocie z emitora.

Rysunki 9 i 10 przedstawiają sytuację, w której emitory usytuowane są blisko siebie (ok. 30 m) oraz daleko od siebie (ok. 70 m).

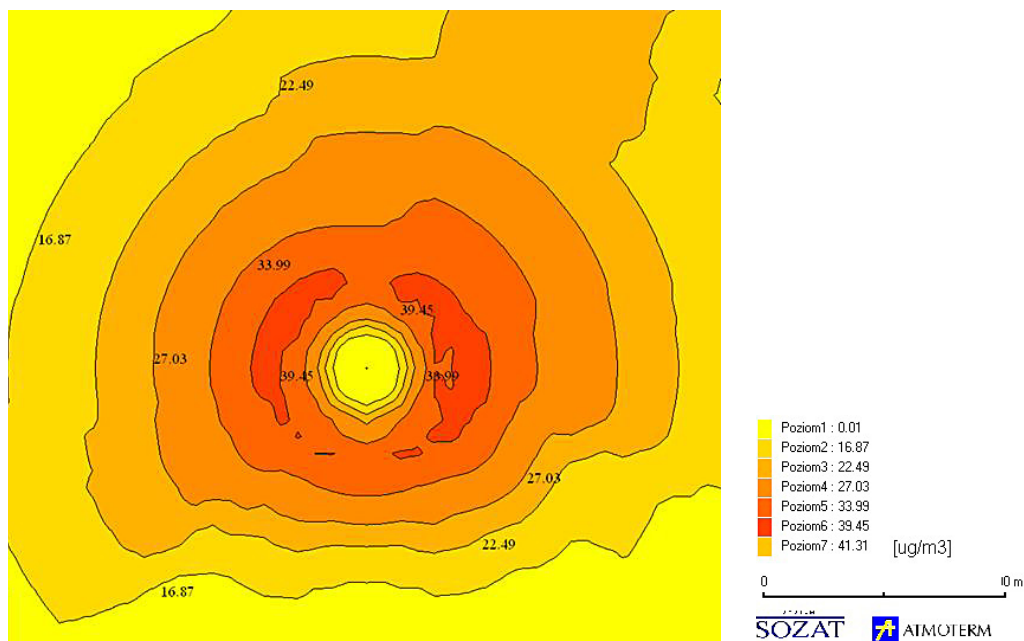
Na rysunkach 11 i 12 zwizualizowano sposób rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w atmosferze w przypadkach, gdy emitory usytuowane są wzdłuż linii równoległej oraz prostopadłej do kierunku najczęściej wiejących wiatrów.

OMÓWIENIE WYNIKÓW

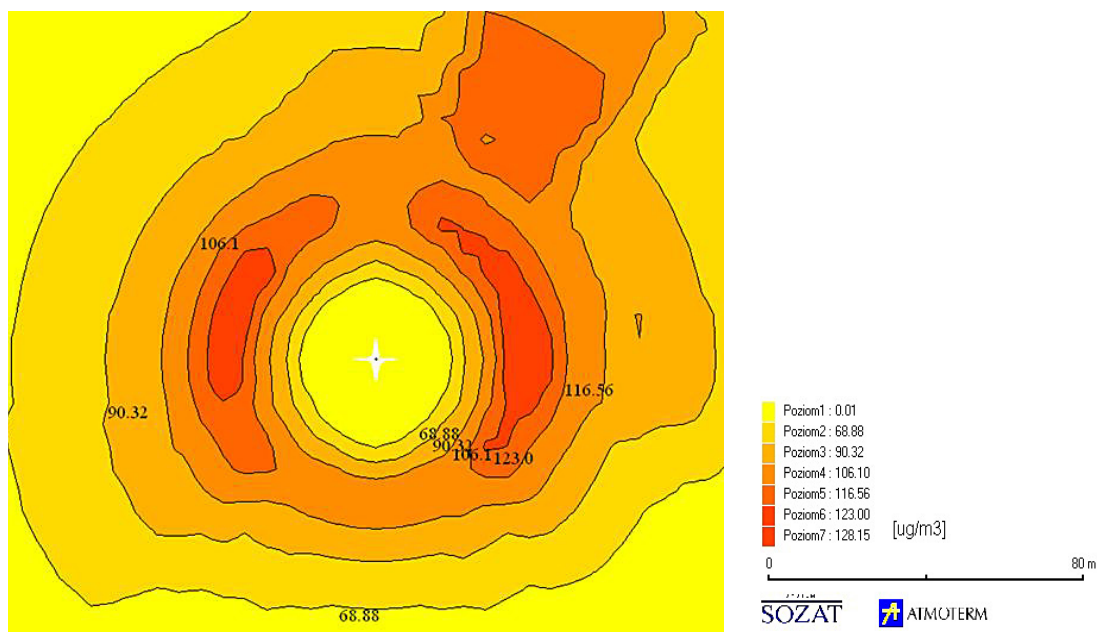
Przeprowadzone obliczenia dotyczyły zmian rozprzestrzeniania się pyłu PM10 w atmosferze wraz ze zmieniającymi się parametrami emitorów i spalin. W artykule przedstawiono po dwa wyni-



Rys. 3. Mapa rozkładu izolinii stężeń maksymalnych pyłu PM10 uśrednionych dla 1h, dla $z_0 = 0,002$ m
Fig. 3. Contour line map of PM10 maximum concentration average for hour, for $z_0 = 0,002$ m



Rys. 4. Mapa rozkładu izolinii stężeń maksymalnych pyłu PM10 uśrednionych dla 1h, dla $z_0=5$ m
Fig. 4. Contour line map of PM10 maximum concentration average for hour, for $z_0=5$ m

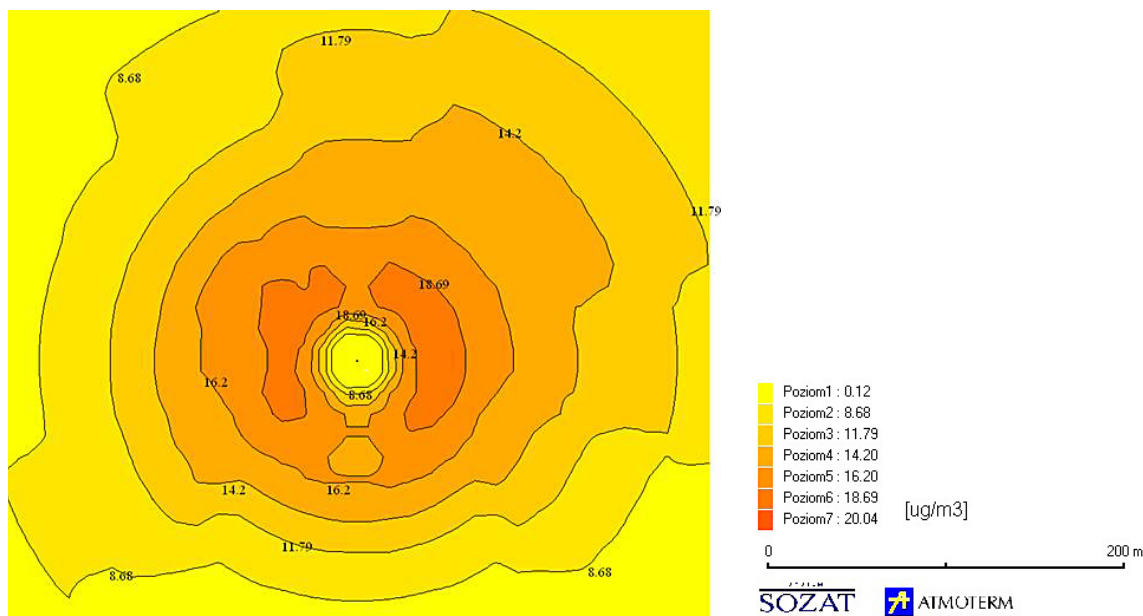


Rys. 5. Mapa rozkładu izolinii stężeń maksymalnych pyłu PM10 uśrednionych dla 1h, dla $v=1$ m/s
Fig. 5. Contour line map of PM10 maximum concentration average for hour, for $v=1$ m/s

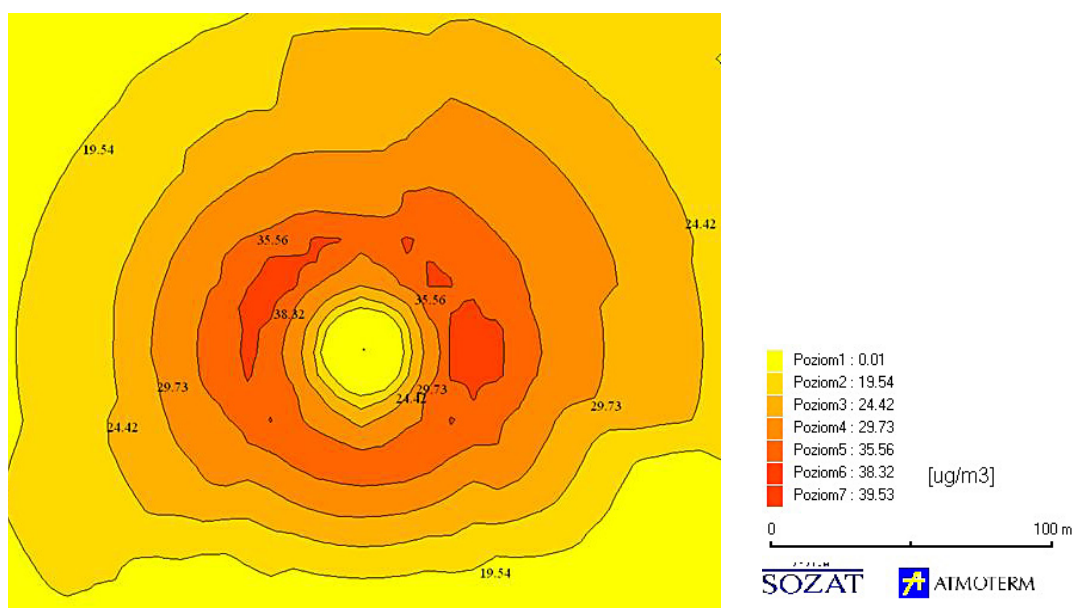
ki dla każdego przypadku, charakterystyczne dla skrajnych sytuacji.

Analizując wpływ współczynnika aerodynamicznej szorstkości terenu na imisję (rys. 3 i 4) łatwo zauważyć, że im wyższy współczynnik z_0 , tym stężenia pyłu w promieniu 100 metrów są wyższe. W przypadku terenów pokrytych łąkami i pastwiskami (rys. 3) pył pojawia się w stężeniach rzędu $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na wysokości siatki obli-

zeniowej dopiero w odległości ok. 80 metrów od emitora. Na terenach wielkomiejskich o wysokiej zabudowie (rys. 4) – już 8 metrów od emitora. Tutaj obszar o najwyższych stężeniach pyłu rozciąga się miejscowo od 3 do 5 metrów od emitora, a stężenia te wynoszą powyżej $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Na obszarach płaskich najwyższe stężenia, rzędu $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ obejmują teren od 100 do 150 m od emitora. Wyniki obliczeń potwierdzają, że to-



Rys. 6. Mapa rozkładu izolinii stężeń maksymalnych pyłu PM10 uśrednionych dla 1h, dla $v=10$ m/s
Fig. 6. Contour line map of PM10 maximum concentration average for hour, for $v=10$ m/s

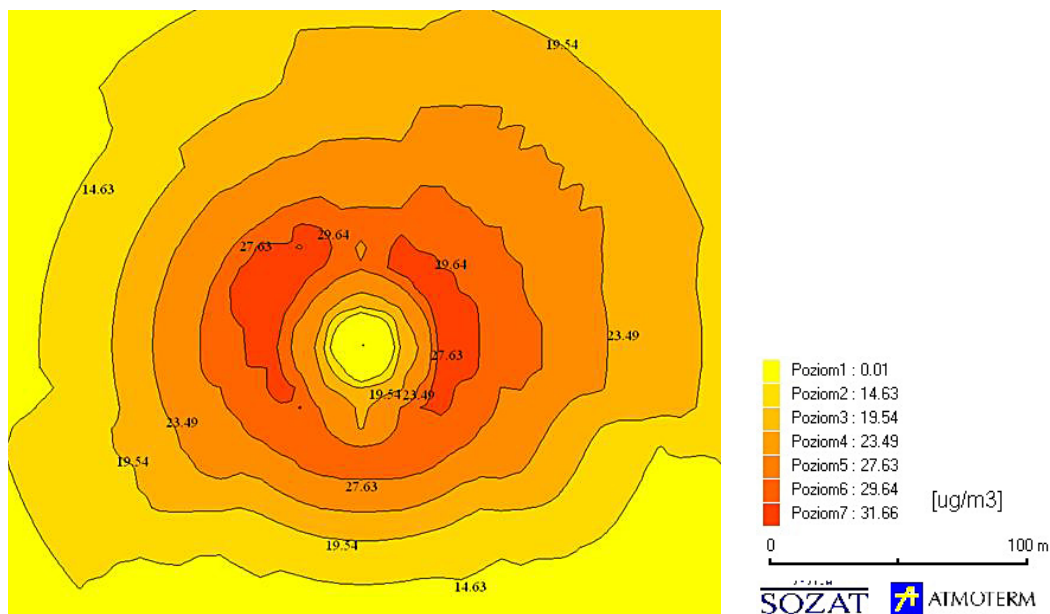


Rys. 7. Mapa rozkładu izolinii stężeń maksymalnych pyłu PM10 uśrednionych dla 1h, dla $T=400$ K
Fig. 7. Contour line map of PM10 maximum concentration average for hour, for $T=400$ K

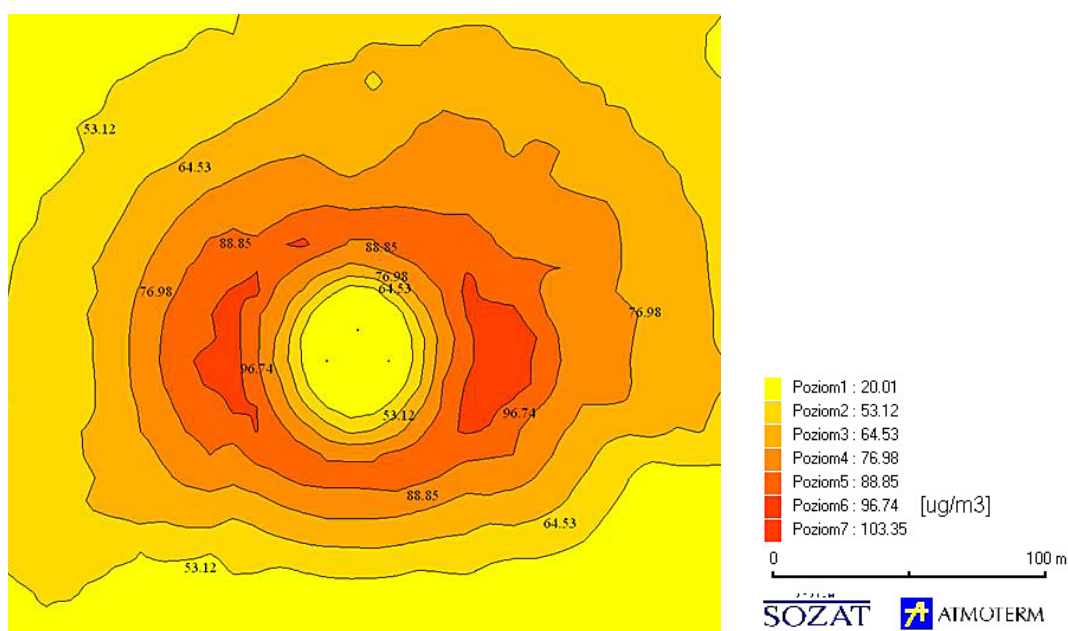
pogrofia terenu ma bardzo duży wpływ na imisję i sposób rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w atmosferze. Tereny płaskie, nie posiadające przeszkód w postaci elementów wysokich, są lepiej przewietrzane niż np. wielkomiejskie, gdzie zanieczyszczenia zostają „zniewolone” pomiędzy zabudowaniami.

Analogicznie przeanalizowano wpływ prędkości wylotowej i temperatury spalin na rozprzestrzenianie się pyłu zawieszonoego w atmosferze. Modelowanie rozprzestrzeniania się zanieczysz-

czeń w atmosferze poprzez wprowadzanie różnych prędkości spalin na wylocie z emitora wykazało, że im większa prędkość tym mniejsza imisja. W przypadku prędkości wynoszącej 1 m/s (rys. 5) pył obecny był w powietrzu w odległości ok. 19 m od emitora, kiedy to jego stężenie wzrastało do ok. $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Przy prędkości wylotowej 10 m/s (rys. 6), już w odległości ok. 12 m od emitora stężenie pyłu osiągało ok. $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Różnice między izoliniami wynosiły tu rzędu kilku $\mu\text{g}/\text{m}^3$, podczas gdy przy niższej prędkości – rzędu kilku-



Rys. 8. Mapa rozkładu izolinii stężeń maksymalnych pyłu PM10 uśrednionych dla 1h, dla T=600 K
 Fig. 8. Contour line map of PM10 maximum concentration average for hour, for T=600 K

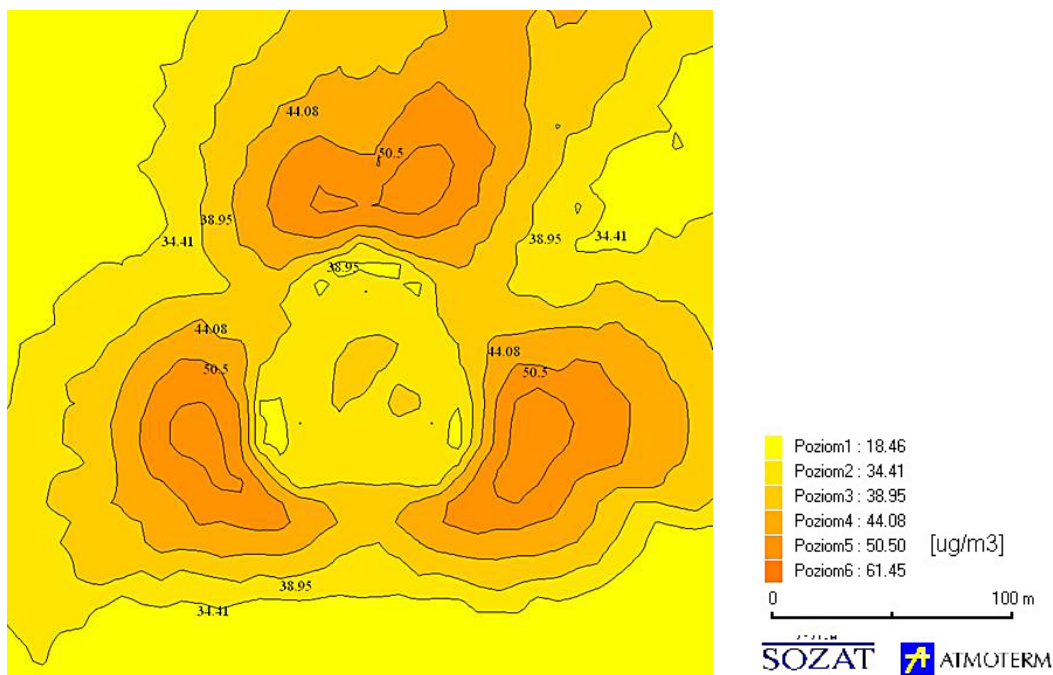


Rys. 9. Mapa rozkładu izolinii stężeń maksymalnych pyłu PM10 uśrednionych dla 1h, przy usytuowaniu emitatorów w odległości ok. 30 m od siebie
 Fig. 9. Contour line map of PM10 maximum concentration average for hour, for emitter location 30 m from itself

nastu do kilkudziesięciu $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Najwyższa imisja lokalizowała się ok. 28 do 38 m od emitora, z którego spaliny wydostawały się do atmosfery z prędkością 1 m/s i wynosiła do $128 \mu\text{g}/\text{m}^3$, podczas gdy przy 10 m/s najwyższe stężenia pyłu wynosiły do $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i występowały 37 do 67 m od emitora. Można więc stwierdzić, że wyższe prędkości gazów na wylocie z emitora sprzyjają niższemu stężeniu zanieczyszczeń w atmosfere

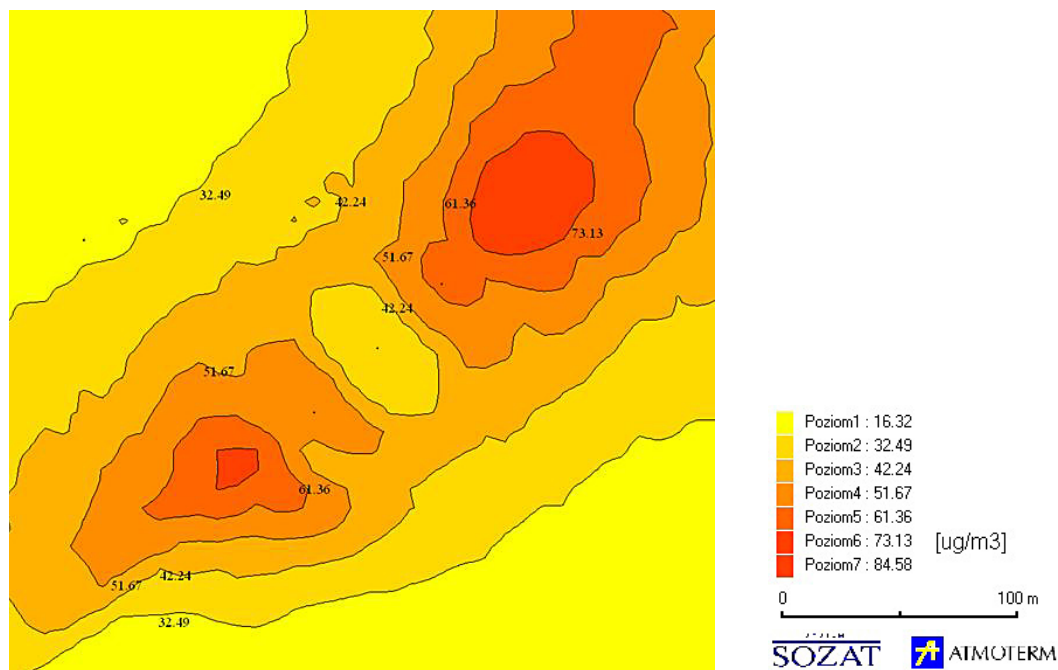
rze w okolicy emitora. Większa prędkość gazu powoduje bowiem zwiększenie wyniesienia gazów, a co za tym idzie zwiększenie efektywnej wysokości emitora, co z kolei sprzyja lepszemu rozcieńczaniu smugi dymu w atmosferze i niższej imisji w okolicy.

Analizując wpływ temperatury spalin na imisję zaobserwowano, że przy wyższej temperaturze T=600 K (rys. 8) stężenia pyłu są nieznacznie



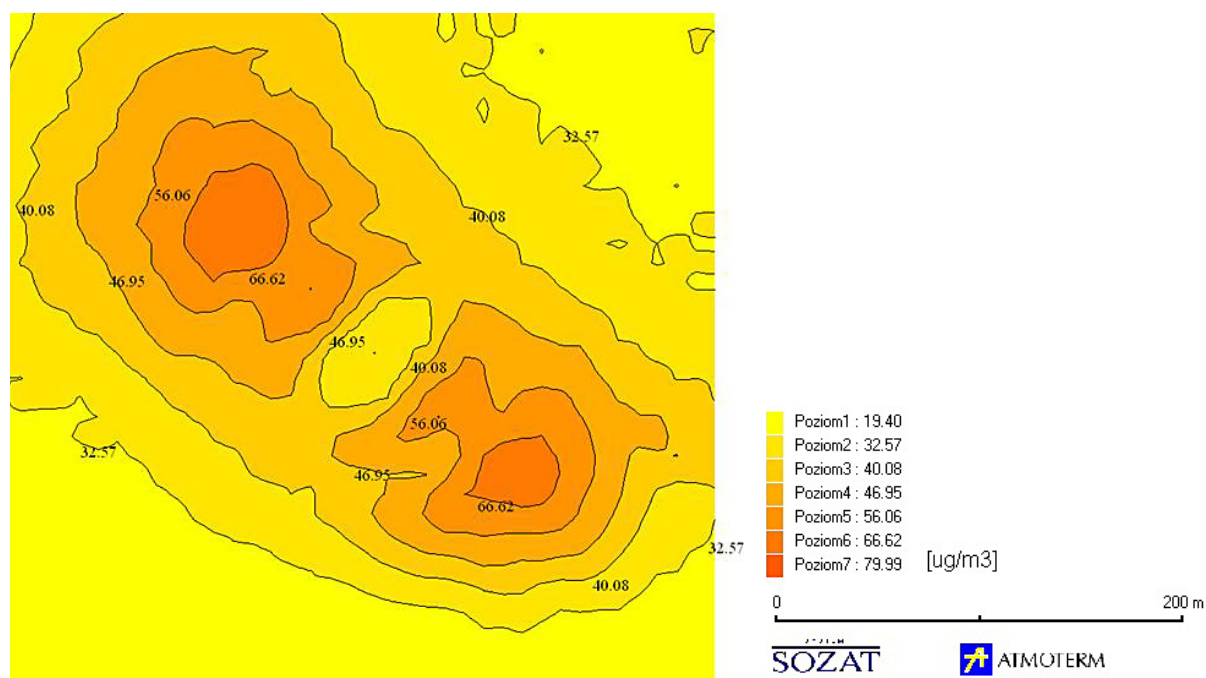
Rys. 10. Mapa rozkładu izolinii stężeń maksymalnych pyłu PM10 uśrednionych dla 1h, przy usytuowaniu emitorów w odległości ok. 70 m od siebie

Fig. 10. Contour line map of PM10 maximum concentration average for hour, for emitter location 70 m from itself



Rys. 11. Mapa rozkładu izolinii stężeń maksymalnych pyłu PM10 uśrednionych dla 1h, przy usytuowaniu emitorów wzdłuż linii równoległej do kierunku najczęściej wiejących wiatrów

Fig. 11. Contour line map of PM10 maximum concentration average for one hour, for emitter location endways of wind direction



Rys. 12. Mapa rozkładu izolinii stężeń maksymalnych pyłu PM10 uśrednionych dla 1h, przy usytuowaniu emitatorów wzdłuż linii prostopadłej do kierunku najczęściej wiejących wiatrów

Fig. 12. Contour line map of PM10 maximum concentration average for one hour, for emitter location on line perpendicular of wind direction

niższe niż przy $T=400$ K (rys. 7). Stężenia rzędu $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ obecne są w odległości ponad 30 m od emitora w przypadku spalin o $T=400$ K, a przy $T=600$ K w odległości ok. 50 m. Najwyższa imisja pyłu zawieszonego osiąga wartości do $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ w przypadku $T=400$ K i nieznacznie powyżej $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ przy $T=600$ K. Wynika stąd, że temperatura spalin ma nieznaczny wpływ na imisję zanieczyszczeń w okolicy emitatorów.

W dalszej części analizowano znaczenie lokalizacji zespołu emitatorów w terenie w procesie rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w atmosferze. Na rysunku 9 przedstawiono rozkład izolinii stężeń pyłu PM10 emitowanego przez 3 emitatory o jednakowych parametrach geometrycznych i roboczych, usytuowanych w narożnikach trójkąta oddalonych od siebie o 30 m. W odległości ok. 27 m od środka tego trójkąta stężenie pyłu rosło począwszy od $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, by 45 m od tego punktu osiągnąć wartości rzędu $97 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Najwyższe stężenie obliczone przez program wynosiło $103 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Sytuację tą porównano ze stanem przedstawionym na rysunku 10, gdzie emitatory oddalono od siebie o 70 m. W tym przypadku stężenia rzędu $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zaobserwowano dopiero w odległości 50 m od środka. Najwyższe stężenia PM10 obliczono w punktach siatki obliczenio-

wej, oddalonych od środka trójkąta o 70 do $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Z analizy porównawczej wynika, że podczas, gdy oddalono emitatory od siebie ponad dwukrotnie, najwyższe obliczone stężenia zmalały prawie dwukrotnie, a obszary z tymi wartościami lokalizowały się dalej od emitatorów w przypadku drugim (rys. 10).

W ramach modelowania rozpatrzono także dwa skrajne przypadki: w pierwszym emitatory zlokalizowano wzdłuż linii zbliżonej do kierunku najczęściej wiejących wiatrów (rys. 11), w drugim- wzdłuż linii zbliżonej do kierunku prostopadłego do kierunku najczęściej wiejących wiatrów (rys. 12). Z analizy tych dwóch przypadków wynika, że korzystniejsze dla stanu jakości powietrza atmosferycznego jest rozmieszczenie emitatorów bliskie linii prostopadłej do kierunku wiatrów. Ogranicza to zjawisko nakładania się smug kominowych i zwiększania zanieczyszczenia powietrza w okolicy emitatorów.

WNIOSKI

1. Stężenia zanieczyszczeń w powietrzu obserwowane na wysokości siatki obliczeniowej są wprost proporcjonalne do współczynnika ae-

rodynamicznej szorstkości terenu, czyli rosną wraz ze wzrostem współczynnika z_0 . Odległość obszaru o najwyższych wartościach emisji lokalizuje się bliżej emitora przy wyższym współczynniku z_0 .

2. Prędkość wylotowa gazów z emitora wpływa odwrotnie proporcjonalnie na stężenia zanieczyszczeń w atmosferze, czyli im większa prędkość gazów odlotowych, tym większe ich wyniesienie i niższe wartości stężeń zanieczyszczeń w atmosferze. Wartości maksymalne obserwuje się w mniejszych odległościach od emitora przy mniejszych prędkościach wylotowych.
3. Obniżenie temperatury spalin skutkuje nieznacznie wyższymi stężeniami zanieczyszczeń w atmosferze w okolicy emitora.
4. Korzystniejszą lokalizacją zespołu emitatorów charakteryzują się emitatory usytuowane daleko od siebie, ewentualnie na linii zbliżonej do kierunku prostopadłego do kierunku najczęściej wiejących wiatrów. W tych przypadkach rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń emitowanych z zespołu emitatorów stwarza najmniejsze zagrożenie dla okolicznych terenów.

BIBLIOGRAFIA

1. Ek100w – Instrukcja Użytkownika 2007, Atm-term, Opole.
2. Juda J., Chróściel S. 1974. Ochrona powietrza atmosferycznego, Wyd. NT, Warszawa.
3. Juda-Rezler K. 2000. Oddziaływanie zanieczyszczeń powietrza na środowisko, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
4. Markiewicz M.T. 2004. Podstawy modelowania rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
5. Michalczyk J.K. 2003. Rozprawa doktorska, promotor: dr hab. Krzysztof Murawski, prof. UMCS, Transport gazowych zanieczyszczeń w powietrzu – symulacje numeryczne w skali lokalnej, Lublin. http://kft.umcs.lublin.pl/kmur/download/prace_dr/J_Michalczyk.pdf [dostęp: 9.XI.2016 r.]
6. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 26 stycznia 2010r. w sprawie wartości odniesienia dla niektórych substancji w powietrzu.
7. Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska. Dz. U. nr 62, poz. 627.
8. Zwoździak J., Zwoździak A., Szczurek A. 1998. Meteorologia w ochronie atmosfery, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.