

Obliczanie emisji z hałd i zwałowisk w pakiecie Operat FB

Zjawisko wtórnego pylenia to niezorganizowana emisja do atmosfery cząstek pyłu z różnych powierzchni na skutek oddziaływania sił zewnętrznych na złożu.

Najczęściej pobudzone do emisji cząstki były uprzednio osadzone na powierzchni pod wpływem opadania grawitacyjnego, co tłumaczy nazwę procesu „wtórne pylenie”. Mechanizm wtórnej emisji pyłów jest poznany tylko fragmentarycznie.

W szczególności nie ma, jak dotąd, uniwersalnego opisu ilościowego tego zjawiska. Proces wtórnego pylenia jest spowodowany na ogół przez przepływ powietrza nad powierzchnią ze zdeponowanym pyłem, aczkolwiek może też być wywoływany bezpośrednim, mechanicznym oddziaływaniem na zboże.

Wielkość emisji z jednostki powierzchni jest skomplikowaną, nie do końca poznaną, funkcją: średnicy ziaren pyłu, ich kształtu, gęstości oraz sił adhezji wiążących cząstki pyłu ze złożem. Emisja zależy również od prędkości wiatru i turbulencji, jak też od czasu trwania tych czynników. Wpływają na nią także inne czynniki atmosferyczne, takie jak temperatura i wilgotność. Najważniejszymi parametrami są jednak opady deszczu i śniegu, których występowanie, nawet w bardzo niewielkim natężeniu, radykalnie ogranicza, a nawet eliminuje wtórne pylenie.

Po oderwaniu się cząstek od podłoża następuje ich przemieszczenie do atmosfery.

Proces ten zależy od profilu koncentracji cząstek w warstwie granicznej.

Należy przy tym wyraźnie zaznaczyć, że warstwa graniczna wtórnego pylenia rozciąga się tylko w bezpośredniej bliskości powierzchni ze zdeponowanym pyłem (złożem) i jest bardzo cienka – rzędu kilku centymetrów. Jest czymś zupełnie różnym od zwykle rozważanej atmosferycznej warstwy granicznej, która rozciąga się na wysokość dziesiątków metrów.

Zachowanie się cząstek, które opuściły „emisyjną warstwę graniczną” i rozproszyły się na zewnątrz niej w kierunku atmosferycznej warstwy mieszania może być opisane za pomocą klasycznej teorii dyfuzji atmosferycznej i poprzez klasyczne modelowanie.

Pylenie na skutek działania wiatru następuje, praktycznie biorąc dopiero wtedy, **gdy prędkość wiatru przekroczy pewną prędkość graniczną**, poniżej której emisja ze złoża gwałtownie maleje.

Badania nad czasowymi zmianami pylenia wykazały, że **maksymalna emisja pyłu utrzymuje się tylko przez kilka-kilkanaście sekund** po czym szybko maleje. Według obserwacji Fromentina po ok. 17 minutach wystąpił dziesięciokrotny spadek emisji, a po 3 godzinach emisja zmniejszyła się 100-krotnie.

Ustalenie emisji ze zwałowisk węgla

Emisja maksymalna

Do obliczenia maksymalnej emisji pyłu wykorzystano wzór Ciszewskiego i Wojciechowskiego zmodyfikowany przez Pastuszkę [3]:

$$\varepsilon_i = 6,58 \cdot 10^{-2} RP \sqrt{\frac{d_i}{D}} \frac{\rho}{g} (u - u_t)^3 f_i$$

gdzie:

ε_i - emisja frakcji i, tzn. pyłów o średnicach zawartych w przedziale i, kg/(m² x s).

P- parametr, równy 1,5 dla ziaren jednorodnych i 2,8 dla ziaren o szerokim zakresie granulacji,

R- parametr, dla szerokiej klasy składowisk równy 10⁻⁵ m⁻¹

d_i - średnia ważona średnica danej frakcji,

D- tzw. średnica standardowa, D=250 μm

ρ - gęstość powietrza ,

g- przyspieszenie ziemskie (9,81 m / s²),

f_i - udział pyłów danej frakcji na złożu,

U- prędkość wiatru.

U_t - prędkość progowa (pseudoprogowa).

Równanie jest słuszne dla krótkich przedziałów czasu, dla których prędkość wiatru można uznać za stałą . Drugim ograniczeniem jest wywianie warstwy powierzchniowej pyłów ze składowiska. Chodzi o to , że druga warstwa , wystawiona po wywianiu pierwszej na bezpośrednie działanie wiatru jest na ogół mocniej związana a więc prędkość progowa dla tej warstwy jest większa. Omawiane równanie jest zatem przydatne do badania dynamiki procesu wtórnego pylenia oraz obliczania stężeń chwilowych .W takich przypadkach należy najpierw wyznaczyć rozkład ziarnowoty pyłu zdeponowanego na zwałowisku w celu ustalenia wartości f_i oraz stosownej wartości d_i . W tym celu należy pobrać z powierzchni zwałowiska reprezentatywne próbki pyłu i przeprowadzić analizę sitową .

Przykładowy skład frakcyjny pyłu na hałdzie węgla wg [3]

Frakcja μm	Udział %
<10	22
10 - 30	12
30 - 50	5
50 - 100	11
100 - 200	9
>200	4

Prędkość progową (graniczną) można odczytać z tabel np.:

Graniczna prędkość dynamiczna u_t^* wg. szacunków amerykańskich

Dla miazłu węglowego:	0,54 m/s
Dla węgla leżącego luzem (np.w otoczeniu zwałowiska):	0,55 m/s
Dla węgla na zwale nieutwardzonym:	1,12 m/s
Dla węgla na zwale, lekko utwardzonym, na którego powierzchni pracował sychacz gąsienicowy	0,62 m/s

Prędkość graniczną można też obliczyć ze wzoru Bagnolda:

$$Vpr_z = 5,75 * 10^{-2} \sqrt{\frac{\rho_z - \rho_p}{\rho_p} g \cdot d \log \frac{z_i}{z_0}}$$

gdzie:

ρ_p – gęstość powietrza

ρ_z – gęstość ziaren cynku lub ołowiu

g – przyspieszenie ziemskie

d – średnica ziaren pyłu w metrach

z_1 – wysokość zwałowiska

z_0 – szorstkość terenu

Emisja roczna

Emisję długookresowa generowana przez erozję wietrzną jest wg. [4] zależna od częstości zaburzeń złoza, przez które rozumie się działanie, w którego wyniku zostaje eksponowana na wiatr nowa (świeża) powierzchnia składowanego materiału.

Na zwałach węgla i miazłu zaburzenie złoza następuje zawsze, gdy jest dysponowana nowa porcja węgla (miazłu), bądź, gdy jest zbierany stary, składowany węgiel z powierzchni zwałowiska. Wskaźnik emisji cząstek pyłu z powierzchni zwału węgla lub miazłu, na skutek wietrznej wynosi:

$$e = k \sum_{i=1}^N P_i$$

e - wskaźnik emisji pyłu, $g/(m^2 \times rok)$,

k - mnożnik frakcyjny ($k=0,5$ dla pyłu PM-10, $k=1$ dla pyłu $> 30 \cdot m$)

N - ilość zaburzeń złoza w ciągu roku,

P_i - funkcja zwana podatnością na erozję, zależna od obserwowanej lub przewidywanej największej prędkości wiatru w pokrywie, dla i -tego okresu pomiędzy zaburzeniami złoza, g/m^2 .

Dla suchej, eksponowanej na działanie wiatru powierzchni, funkcja podatności na erozję może być obliczona wg. następującego wzoru:

$$P = 58(u^* - u_t^*)^2 + 25(u^* - U_t^*)$$
$$P = 0 \text{ dla } u^* \leq u_t^*$$

u^* - prędkość dynamiczna, m/s,

u_t^* - graniczna prędkość dynamiczna, m/s.

Prędkość dynamiczna jest powiązana z prędkością maksymalną w porywach (z najszybszą miłą) następującą zależnością:

$$u^* = 0,053u_{10}^+$$

W przypadku pochylonej powierzchni złoza $u^* = 0,1u_{10}^+$

u_{10}^+ - oznacza maksymalną prędkość wiatru w porywie (najszybszą miłą) wyznaczoną za pomocą anemometru, na wysokości 10 m, w okresie między zaburzeniami złoza, m/s. Jeżeli prędkość u^+ była wyznaczona na jednej wysokości (z), to wartość u_{10}^+ można obliczyć następująco:

$$u_{10}^+ = u^+ \frac{\ln \frac{10}{0,005}}{\ln \frac{z}{0,005}}$$

Przykład obliczenia emisji maksymalnej

Zwałowisko zajmuje 10 ha, średnia wysokość wynosi 5 m. Średnica drobnych frakcji ziaren wynosi 0,25 mm. Prędkość wiatru mierzona anemometrem na wysokości 19 m wynosi 2 m/s, szorstkość terenu $Z_0 = 0,005$ m Gęstość ziaren $7,1 \text{ g/cm}^3$.

Dane :

$$h_a = 14 \text{ m}$$

$$Z_1 = 5 \text{ m}$$

$$Z_0 = 0,005 \text{ m}$$

$$V_a = 2 \text{ m/s}$$

$$d = 0,00025 \text{ m}$$

$$\rho_p = 12,9996 \cdot 10^{-4} \text{ g/cm}^3$$

$$\rho = 7,1 \text{ g/cm}^3$$

$$P = 2,8$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$S = 10 \text{ ha} = 100000 \text{ m}^2$$

Obliczenie prędkości granicznej

$$V_{pr} = 5,75 \cdot 10^{-2} \cdot [(7,1 - 12,9996 \cdot 10^{-4}) / (12,9996 \cdot 10^{-4} \cdot 9,81 \cdot 0,00025)]^{0,5} \\ * \log(5/0,005) = 0,63 \text{ m/s}$$

Prędkość na wysokości złoza

$$U_h = V * \left(\frac{Z_i}{h_a} \right)^m$$

U_h – prędkość na wysokości złoza

Z_1 – wysokość złoza

h_a – wysokość pomiaru prędkości wiatru anemometrem

V – prędkość wiatru zmierzona anemometrem

m – wykładnik meteorologiczny

dla 4 stanu równowagi $m = 0,27$

$$U_h = 2 * (5/14)^{0,27} = 1,51$$

$$E = 6,58 * 10^{-2} * 2,8 * 10^{-5} (0,25 * 1000 / 250)^{0,5} * 1,29 / 9,81 * (1,51 - 0,63)^3 * 1000 \text{ (g/kg)} = 1,65 * 10^{-4} \text{ g/s/m}^2$$

$$\text{Emisja z całej powierzchni} = 1,65 * 10^{-4} \text{ g/s/m}^2 * 100000 = 16,5 \text{ g/s}$$

W celu obliczenia emisji uśrednionej do jednej godziny (zgodnie z pkt. 1.4. rozporządzenia o wartościach odniesienia niektórych substancji w powietrzu "W przypadku trwania maksymalnej emisji krócej niż przez jedną godzinę należy obliczyć najwyższą średnią emisję odniesioną do jednej godziny")

Po scałkowaniu wzoru Fromentina dla $t = 3600$ s, uzyskano wielkość emisji godzinowej równą 711 emisji w pierwszej sekundzie.

$$F_r = F_r(t = 0) \cdot \int t^{-b} dt$$

$$\text{Emisja uśredniona do 1 godziny} = 16,5 \text{ g/s} * 711 / 3600 = 3,26 \text{ g/s.}$$

Widok danych w oknie pakietu Operat FB (fragment)

Emisja z hałd i zwałowisk materiałów sypkich N-1 Hałda 10 ha

Liczba frakcji: 1 Gęstość materiału na złoże: 7,1 g/cm³ Wysokość złoże: 5 m Powierzchnia: 100000 m² OK

Wyniki analizy ziarnowej złoże

Lp.	Środek przedziału, mm	Udział frakcji, %	Prędkość progowa m/s
1	0,25	100	0,63

Szorstkość powierzchni zwałowiska: 0,005 m

Prędkość progowa obliczana z rozmiaru ziarna
 ziarna jednorodne P=1,5 Anuluj Pomoc

Fragment wydruku wyników

Prędkość wiatru na wysokości złoże (U_h) m/s

u m/s /stan równ.	1	2	3	4	5	6
1	0,92	0,86	0,82	0,76	0,69	0,6
2	1,84	1,73	1,63	1,51	1,38	1,2
3	2,76	2,59	2,45	2,27	2,06	1,9
4	-	3,45	3,27	3,03	2,75	2,5
5	-	4,32	4,09	3,79	3,44	-
6	-	-	4,90	4,54	-	-
7	-	-	5,72	5,30	-	-
8	-	-	6,54	6,06	-	-
9	-	-	-	6,82	-	-
10	-	-	-	7,57	-	-
11	-	-	-	8,33	-	-

Wskaźniki emisji dla frakcji 0,25 mm g/m²/s

u m/s /stan równ.	1	2	3	4	5	6
1	-	-	-	-	-	-
2	0,00043	0,000323	0,0002428	0,0001654	0,0001024	0,0000
3	0,002346	0,001828	0,001463	0,001071	0,00071	0,0005
4	-	0,00544	0,00447	0,00336	0,002313	0,0016
5	-	0,0122	0,01006	0,00766	0,00539	-
6	-	-	0,0189	0,01451	-	-
7	-	-	0,032	0,02472	-	-
8	-	-	0,0501	0,0389	-	-
9	-	-	-	0,0576	-	-
10	-	-	-	0,0811	-	-
11	-	-	-	0,1108	-	-

Suma emisji wszystkich frakcji, uśredniona do 1 godziny, mg/s

u m/s /stan równ.	1	2	3	4	5	6
1	116,9	58,3	32,9	10,53	1,036	0,004
2	8494	6381	4795	3267	2023	125
3	46332	36100	28904	21148	14020	1005
4	-	107521	88218	66279	45683	3340
5	-	240893	198597	151288	106381	-

Przykład obliczenia emisji rocznej

Obliczyć wielkość emisji pyłu zawieszonego spowodowanego erozją płaskiego, zwału miału węglowego o powierzchni 10 ha. Miał węglowy leży na zwałach miesiąc po czym jest ładowany na samochody. Zwał ma charakter rezerwowy i usypuje się go raz w roku. Z danych najbliższej stacji meteorologicznej wynika, że największa prędkość wiatru w porywach dla okresu 30-dniowego (okres pomiędzy zaburzeniami zwałowiska) mierzona na wysokości 19 m wynosi 50 km/h.

Rozwiązanie :

Powierzchnia zwałowiska wynosi :

$$S = 10 \text{ ha} = 1000000 \text{ m}^2$$

Graniczna prędkość dynamiczna wynosi :

$$U_t^* = 0,54 \text{ m/s}$$

Zaburzenie powierzchni zwałowiska nastąpi z częstotliwością 1 raz na rok : $N = 1 / \text{rok}$

Maksymalną prędkość wiatru w porywie ;

$$U_{10}^+ = U_{19}^+ * \ln(10 / Z_0) / \ln(19 / Z_0)$$

$$U_{10}^+ = U_{19}^+ * \ln(10 / 0,005) / \ln(19 / 0,005) = 46,1 \text{ km/h}$$

$$U_{10}^+ = 46,1 \text{ km/h} = 12,8 \text{ m/s}$$

Graniczna prędkość dynamiczna wynosi :

$U^* = 0,053 \cdot 12,8 \text{ m/s} = 0,68 \text{ m/s}$, prędkość ta przewyższa graniczną prędkość dynamiczną a zatem wystąpi pylenie ;

Podatność na erozję

$$P = 58 (U^* - U_t^*)^2 + 25(U^* - U_t^*)$$

$$P = 58 (0,68 - 0,54)^2 + 25 (0,68 - 0,54) = 4,64 \text{ g/m}^2$$

Roczna emisja będzie równa emisji miesięcznej z okresu istnienia zwału .

Emisja ta wynosi :

Emisja pyłu ogółem

$$E = (1) (4,64 \text{ g/m}^2) (100000 \text{ m}^2) = 464 \text{ kg}$$

Emisja pyłu PM-10

$$E = (0,5) (4,64 \text{ g/ m}^2) (100000 \text{ m}^2) = 232 \text{ kg}$$

Widok okna w pakiecie Operat FB

Prędkość wiatru w porywach 50 km/h mierzona na wysokości 19 m

Liczba zaburzeń złoża w ciągu roku 1 Pozioma powierzchnia złoża

Zanieczyszczenia, których emisja zależy od prędkości wiatru (substancje zawarte w pyłe)

- pył ogółem
- ołów
- miedź

Emisja maksymalna dla wszystkich stanów równowagi atmosfery

Wyniki obliczeń:
 Emisja roczna = 4,64 g/m² 464 kg
 Dynamiczna prędkość wiatru u10* = 0,68 m/s

Prędkość wiatru m/s	Emisja maksymalna g/s/m ²	Emisja uśredniona do 1 godziny mg/s
1	0,00001332	263,1
2	0,000533	10534
3	0,002656	52457
4	0,00598	118147
5	0,01311	258952
6	0,02012	397378

Zależność emisji maksymalnej od prędkości wiatru

Fragment wydruku

Emisja roczna

Łączna emisja pyłu w ciągu roku została obliczona wg. metodyki AP-42 EPA - Industrial Wind Erosion.

Prędkość wiatru w porywach: 50 km/h (13,9 m/s) zmierzona na wysokości 19 m.

Dynamiczna prędkość wiatru u10* = 0,68 m/s

Liczba zaburzeń złoża w ciągu roku N = 1

Fracja, mm	U _t m/s	P, g/m ²	Emisja roczna, kg
0,25	0,54	4,64	464
Razem			464

Obliczanie stężeń w powietrzu

Stężenia maksymalne

Program w zależności od prędkości wiatru i stanu równowagi atmosfery podstawia różne wartości emisji zanieczyszczeń do atmosfery.

W przypadku obliczania stężeń pyłu najpierw uwzględniany jest udział frakcji < 10 mm w emitowanym pyłe wpisywany na stronie "Frakcje".

Przykład zależności emisji maksymalnej od warunków meteorologicznych:

u m/s /stan równ.	1	2	3	4	5	6
1	116,9	58,3	32,9	10,53	1,036	0,00479
2	8494	6381	4795	3267	2023	1257
3	46332	36100	28904	21148	14020	10055
4	-	107521	88218	66279	45683	33408
5	-	240893	198597	151288	106381	-
6	-	-	373274	286599	-	-
7	-	-	632263	488309	-	-
8	-	-	989707	767615	-	-
9	-	-	-	1137146	-	-
10	-	-	-	1602591	-	-
11	-	-	-	2188852	-	-

Jeśli pył zawiera 22 % frakcji PM-10 do obliczenia stężeń maksymalnych, dla prędkości wiatru 11 m/s i 4 stanu równowagi, zostanie podstawiona emisja 48147 mg/s.

Poniżej fragment wydruku wyników obliczeń stężeń maksymalnych w zakresie skróconym:

WYNIKI OBLICZEŃ STĘŻEŃ MAKSYMALNYCH

Zanieczyszczenie :	pył PM-10		emisja : 481547 [mg/s]		
D1 = 280 µg/m ³	stężenie maksymalne [µg/m ³]	odległość wystąpienia steż. maks. [m]	krytyczny stan równowagi atmosfery	krytyczna prędkość wiatru	ocena
Na poziomie terenu	24358	30,5	4	11	Smm > D1
Przy budynku mieszkalnym	313,8	-	4	11	Sxz > D1

Podobnie będzie podstawiana emisja maksymalna do obliczeń w sieci receptorów .

W przypadku obliczania stężeń innych substancji zawartych w pyłe program będzie mnożył emisję przez stosunek emisji pyłu dla danej sytuacji meteorologicznej do maksymalnej emisji pyłu.

Np. dla 4 stanu równowagi i prędkości wiatru 9 m/s mnożnik = $1137146/2188852 = 0,52$.
Zakładając, że maksymalna emisja ołowiu wynosi 30 mg/s, emisja ołowiu dla 4 stanu równowagi i prędkości wiatru 9 m/s wynosi $0,52 * 30 = 15,6$ mg/s

Uwaga: taki sposób obliczeń może być stosowany gdy przykładowy ołów jest zawarty w pyłe (związany fizycznie), a nie w przypadku gdy występują osobne ziarna związków ołowiu.

Stężenia średnie

Do obliczenia stężeń średnich program wykorzystuje emisję średnią, obliczaną ze stosunku emisji w danym okresie do czasu trwania okresu. Emisja zachodzi tylko wtedy gdy dynamiczna prędkość wiatru w porywach jest większa od prędkości progowej. Tabela sytuacji meteorologicznych stosowana do obliczeń stężeń nie uwzględnia z reguły prędkości występujących podczas porywów wiatru. Np. górna prędkość z tabeli to 11 m/s, prędkość w porywach zwykle jest większa np. 100 km/h to 27,7 m/s. Dlatego obliczenia stężeń średnich zostaną przeprowadzone przy założeniu, że 100% emisji występuje przy prędkości wiatru 11 m/s.

Literatura:

1. A. Ciszewski , K. Wojciechowski „Metody obliczania stanu zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego powodowanego przez źródła powierzchniowe” Ochrona powietrza , nr 6/82.
2. Wyroba Z., Pastuszka J., Korcz M., Terakowski M., Ocena wpływu na środowisko istniejących zwałowisk KWK "Rydułtowy" w Wodzisławie Śl. w Rydułtowach. Raport Instytutu Ochrony Środowiska 246/ZTO/-90 Katowice 1990.
3. Emisja pyłu ze zwałowisk węgla i miału. Pastuszka J.S. Ochrona Atmosfery i Problemy Odpadów 2/96.
4. EPA EP-42 13.2.5 Industrial Wind Erosion
5. Kenneth Pye, Haim Tsoar. Aeolian Sand and Sand Dunes. Springer 2009.