ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1971

Seria: INŻYNIERIA SANITARNA z. 17 Nr kol. 305

Zenon Synoradzki

OBLICZANIE STĘŻEŃ GAZOWYCH ZANIECZYSZCZEŃ POWIETRZA W PRZYZIEMNEJ WARSTWIE ATMOSFERY

WSTĘP

Przy projektowaniu nowych i rekonstrukcji istniejących urządzeń przemysłowych konieczne jest uwzględnianie postulatów ochrony środowiska przyrodniczego, w tym także - ochrony powietrza atmosferycznego przed zanieczyszczeniem. Większość procesów produkcyjnych związana jest bezpośrednio lub pośrednio z emisją zanieczyszczeń do atmosfery. Wynikiem emisji jest wystąpienie w pobliżu emitora określonych stężeń zanieczyszczenia w powietrzu atmosferycznym. Obliczenia tych stężeń, ze względu na złożoną postać funkcji opisujących rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń w atmosferze, są bardzo pracochłonne. Zastosowanie elektronicznej techniki obliczeniowej umożliwia wprawdzie znaczne skrócenie czasu obliczeń, nie wyklucza jednak potrzeby wykonywania obliczeń metodami tradycyjnymi. W niniejszej pracy przedstawiono metodę umożliwiającą szybkie obliczenie rozkładów stężeń w przyziemnej warstwie atmosfery, w pobliżu emitora punktowego.

PODSTAWY TEORETYCZNE

Stężenia zanieczyszczeń gazowych w przyziemnej warstwie atmosfery, spowodowane emisją ze źródła punktowego, można obliczyć z wzoru Suttona [2]

$$X(x,y) = \frac{2E}{\pi C_y C_z \bar{u}\, x^{2-n}} \exp\left[-\frac{y^2}{C_y^2\, x^{2-n}} - \frac{H^2}{C_z^2\, x^{2-n}}\right] \tag{1}$$

Funkcja (1) posiada maksimum, które występuje na linii wiatru (y=o) w odległości od emitora:

$$x_{max} = \left(\frac{H}{C_z}\right)^{\frac{2}{2-n}} \tag{2}$$

Maksymalne stężenie zanieczyszczenia, występujące w tym punkcie wynosi

$$X_{max} = \frac{2E}{\pi e \bar{u}\, H^2} \left(\frac{C_z}{C_y}\right) \tag{3}$$

W warunkach zbliżonych do stanu równowagi obojętnej w atmosferze i wysokościach wyrzutu emisji wyższych od 10 m ponad poziom terenu, przyjmuje się, że zanieczyszczenia gazowe rozprzestrzeniają się z jednakową prędkością w kierunkach prostopadłych, do wiatru ($C_y = C_z$). Równanie (3) przyjmuje wtedy prostszą postać.

$$X_{max} = 0{,}235 \frac{E}{\bar{u} H^2} \tag{4}$$

Obliczenie stężeń na podstawie równania (1) związane jest z uciążliwym obliczaniem wyrażeń potęgowych i wykładniczych i wymaga korzystania z tablic funkcji e^{-x}. Tok tych obliczeń został znacznie uproszczony i usystematyzowany po wprowadzeniu przez FALKa [1] zmiennych bezwymiarowych:

$$P = \left(\frac{x}{x_{max}}\right)^{2-n} \tag{5}$$

$$P_y = \frac{y}{H} \tag{6}$$

$$P_s = \frac{X}{X_{max}} \tag{7}$$

Po podstawieniu wyrażeń (5-7) do równania (1) otrzymuje się równanie SUTTONa w postaci funkcji dwóch zmiennych bezwymiarowych.

$$P_s = \frac{e}{P_x} \exp\left(-\frac{P_y^2 + 1}{P_x}\right) \tag{8}$$

Obliczenie stężeń w dowolnym punkcie o współrzędnych (x,y) polega na wyznaczeniu: stężenia maksymalnego, odległości stężenia maksymalnego oraz na tej podstawie - współrzędnych bezwymiarowych P_x i P_y. Następnie na podstawie równania (8) oblicza się stężenie bezwymiarowe P_s, które przelicza się na podstawie równości (7) na stężenie bezwzględne.

Dla ułatwienia realizacji tych obliczeń skonstruowano tablicę funkcji P_s umożliwiającą bezpośredni odczyt wartości liczbowych tej funkcji na podstawie wartości zmiennych P_x i P_y (tablica 1). Przedstawiona tablica obejmuje wartości funkcji P_s w zakresie od 10^{-4} do 1, obliczone dla wartości argumentu P_x zawartych w zakresie od 0,25 do 250. Ze względu na specyficzny przebieg funkcji P_s, stabelaryzowano ją w zakresach zmiennej P_y, zależnych od odpowiednich wartości zmiennej P_x. Odstępy wartości zmiennych P_x i P_y dobrano tak, aby błąd odczytu wartości P_s, przy zastosowaniu

Tablica 1

Funkcja $P_s = \frac{e}{P_x} \exp\left(-\frac{P_y^2 + 1}{P_x}\right)$

P_x	P_y									P_x
	0,00	0,05	0,10	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	150	
			10^{-3}		10^{-4}					
0,250	199	197	191	155	733	210	36	4		0,250
0,260	223	221	217	176	856	259	48	6		0,260
0,270	248	246	245	198	979	309	61	8	1	0,270
0,275	260	258	251	207	105	337	69	9	1	0,275
0,280	273	270	263	218	112	366	77	10	1	0,280
0,285	285	283	276	229	119	396	86	12	1	0,285
0,290	298	296	288	240	126	429	95	14	1	0,290
0,292	303	300	293	245	129	440	99	14	1	0,292
0,294	308	305	298	249	132	452	102	15	1	0,294
0,296	313	310	303	254	135	465	107	16	1	0,296
0,298	318	316	308	258	138	482	111	17	2	0,298
0,300	323	321	313	262	140	496	115	18	2	0,300
0,305	336	333	325	274	148	531	126	20	2	0,305
0,310	348	346	337	285	156	581	138	23	2	0,310
0,315	361	358	350	296	163	605	151	25	3	0,315
0,320	373	370	362	307	171	637	164	28	3	0,320
0,340	422	419	410	351	202	807	223	43	6	0,340

P_x	P_y											P_x
	0,00	0,05	0,10	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	
			10^{-3}					10^{-4}				
0,34	422	419	410	351	202	807	223	43	6			0,34
0,36	469	466	457	395	234	983	291	61	9	1		0,36
0,38	515	511	501	437	267	117	371	84	14	2		0,38
0,40	558	554	544	477	298	137	458	112	20	3		0,40
0,43	618	614	604	534	345	167	604	163	33	5		0,43
0,46	672	668	658	587	390	198	764	225	50	9	1	0,46
0,49	720	716	706	634	433	229	936	297	73	14	2	0,49
0,52	764	760	749	678	472	259	112	378	101	21	4	0,52

P_x	P_y													P_x
	0,00	0,05	0,10	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	
			10^{-3}					10^{-4}						
0,52	764	760	749	678	472	259	112	378	101	21	4			0,52
0,55	802	799	788	716	509	288	130	468	134	31	6	1		0,55
0,59	846	842	832	757	555	326	155	606	187	46	10	2		0,59
0,62	874	870	860	790	584	353	174	702	262	64	13	2		0,62
0,65	898	894	884	816	611	378	193	811	282	81	19	4		0,65
0,70	931	927	917	851	651	417	223	998	372	117	33	7	1	0,70
0,75	955	952	943	878	685	451	252	119	476	161	46	11	2	0,75
0,80	974	970	961	900	712	482	279	138	585	212	66	17	4	0,80
0,85	986	983	975	916	735	509	304	157	699	268	89	26	6	0,85
0,90	994	992	983	928	753	532	327	171	816	331	117	36	10	0,90

P_x	P_y																P_x
	0,00	0,05	0,10	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	3,00	3,50	4,00	
	10^{-3}								10^{-4}								
0,90	994	992	983	928	753	532	327	171	816	331	117	36	10				0,90
0,95	999	996	989	935	768	553	349	193	936	396	148	48	14	1			0,95
1,00	1000	998	990	940	779	570	368	210	105	466	183	63	19	1			1,00
1,1	996	993	986	941	793	597	401	240	125	615	250	97	34	3			1,1
1,2	984	983	977	934	799	616	428	268	151	767	351	145	54	5			1,2
1,3	969	967	961	923	799	629	449	291	171	918	447	204	80	9	1		1,3
1,4	950	948	944	909	796	642	465	311	190	106	551	263	107	15	2		1,4
1,6	909	908	904	883	778	640	487	342	223	134	746	384	182	33	3		1,6
1,8	866	865	862	837	748	634	497	364	248	158	939	520	269	58	8		1,8
2,0	824	823	820	799	728	627	500	377	268	177	112	654	362	92	17	1	2,0

P_x	P_y																		P_x
	10^{-3}										10^{-4}								
	0,0	0,10	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	
2,0	824	820	799	728	627	500	377	268	177	112	654	362	92	17	2	1			2,0
2,4	749	747	728	673	591	495	389	292	207	140	904	552	175	44	10	1			2,4
2,8	679	678	664	621	560	478	391	302	226	162	111	728	273	80	22	5	1		2,8
3,2	621	620	609	575	521	455	381	308	239	178	127	881	373	135	41	11	2		3,2
3,6	572	570	562	534	489	434	370	306	244	188	140	101	469	190	67	20	5	1	3,6
4,0	529	528	521	497	460	412	358	302	246	195	149	111	558	248	97	33	9	3	4,0
4,4	492	491	485	465	432	392	345	295	246	198	156	119	637	304	130	50	15	5	4,4
4,8	460	459	454	436	409	373	335	288	243	200	160	125	705	353	164	68	25	8	4,8
5,2	431	430	426	411	387	356	319	278	239	200	163	130	764	409	199	88	35	13	5,2
5,6	406	405	401	388	367	340	306	272	235	199	164	133	814	455	233	109	47	18	5,6
6,0	384	383	380	368	349	326	296	264	230	197	168	135	856	498	266	131	60	24	6,0
6,5	359	358	355	345	329	308	282	254	224	194	165	137	898	544	305	159	76	34	6,5

P_x	P_y																		P_x
	10^{-3}										10^{-4}								
	0	0,5	1,0	1,5	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	9,0	10,0	
6,5	359	345	308	254	137	898	544	305	159	76	34	14	5	2					6,5
7,0	337	324	292	244	138	934	588	344	188	95	45	20	8	3	1				7,0
7,5	317	307	278	235	138	955	620	376	213	113	56	26	11	4	2	1			7,5
8,0	300	290	264	226	137	974	648	406	238	133	68	33	15	7	3	1			8,0
8,5	284	267	252	218	136	986	673	437	263	150	81	41	19	9	4	2			8,5
9,0	270	263	242	210	135	994	693	457	285	168	94	50	25	12	5	2	1		9,0
10	246	240	222	196	132	100	722	497	325	202	119	67	36	18	9	4	1		10
12	208	204	192	173	124	984	751	549	386	260	168	104	61	35	19	10	2		12
14	180	178	168	154	116	951	754	577	426	303	208	138	88	55	33	19	6	1	14
16	160	157	150	139	108	909	742	587	450	334	245	168	114	74	47	29	10	3	16
18	143	141	135	126	101	866	723	587	464	356	266	193	137	93	63	41	16	6	18
20	129	128	123	116	945	824	701	581	470	370	285	214	157	112	78	53	22	9	20

od. tablicy 1

P_x	P_y																		P_x
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	25	30	
			10^{-3}							10^{-4}									
20	129	123	106	824	581	370	214	112	53	22	9	1							20
25	104	100	890	729	551	384	248	147	81	41	19	3							25
30	876	848	767	649	514	381	264	171	104	59	31	7	1						30
35	755	733	673	583	478	369	270	186	121	74	43	12	3						35
40	663	646	599	529	444	355	269	195	134	85	54	18	5	1					40
45	591	578	540	484	414	339	265	199	142	98	65	24	8	2					45
50	533	522	492	445	387	323	259	200	148	105	72	30	11	3					50
55	484	477	451	412	363	308	252	199	152	111	79	35	14	5	1				55
60	446	438	417	383	343	294	244	197	153	115	84	40	17	6	2				60
70	383	377	362	337	305	271	229	190	153	120	92	49	23	10	4	1			70
80	336	331	319	300	275	246	213	182	151	122	96	55	29	14	6	2			80
90	299	295	286	270	250	226	200	173	147	121	98	60	34	17	8	4			90
100	269	266	259	246	229	210	188	165	142	120	99	64	38	21	11	5			100
120	225	223	217	208	197	182	166	149	132	114	98	68	44	27	15	8	1		120
140	193	191	187	181	172	161	149	136	122	108	94	69	48	31	19	11	2		140
160	169	168	165	160	153	144	135	124	113	102	90	68	50	34	22	14	3	1	160
180	150	149	148	143	137	131	123	114	105	96	86	68	50	36	25	16	5	1	180
200	135	134	132	129	125	119	113	106	98	90	82	66	50	38	27	18	6	2	200
250	108	108	106	104	103	98	94	89	83	76	73	61	49	39	30	16	9	3	250

intepolacji liniowej, nie przekraczał dwóch jednostek ostatniej cyfry znaczącej.

PRZYKŁAD OBLICZEŃ

Sposób użycia przedstawionych tablic ilustruje następujący przykład liczbowy: pewna fabryka kwasu siarkowego odprowadza z gazami odlotowymi do atmosfery 10^4 mg/sek dwutlenku siarki. W przeciętnych warunkach ciśnienia i temperatury otoczenia i w stanie równowagi obojętnej w atmosferze, przy średniej prędkości wiatru $\bar{u}$ = 2 m/sek gazy odlotowe wyrzucane są na wysokość 50 m ponad poziom terenu. Należy zbadać rozkład stężeń dwutlenku siarki w przyziemnej warstwie powietrza, w odległości 1800 m od źródła emisji.

Rozwiązanie

Dla warunków rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń, podanych w temacie zadania, przyjęto: $C_z = C_y$. Na podstawie danych SUTTONa [2] przyjęto wartości: n = 0,25 oraz $C_z = 0{,}10\ m^{0{,}125}$.

Odległość stężenia maksymalnego, obliczona z wzoru (2) wynosi

$$X_{max} = \left(\frac{50}{0{,}10}\right)^{\frac{2}{2-0{,}25}} = 1200\ m$$

Stężenie maksymalne, obliczone z wzoru (4) wynosi

$$X_{max} = 0{,}235\ \frac{10^4}{2{,}0\ 50^2} = 0{,}470\ mg\ SO_2/m^3$$

Bezwymiarowa odległość, obliczona z wzoru (5) wynosi

$$P_x = \left(\frac{1800}{1200}\right)^{2-0{,}25} = 2{,}03 \sim 2{,}0$$

Następnie oblicza się stężenia dwutlenku siarki jako funkcję odległości od emitora, mierzonej w kierunku osi y. W tym celu odczytuje się z tablicy 1 wartości funkcji P_s dla wszystkich wartości zmiennej P_y przy zmiennej P_x = 2,0.

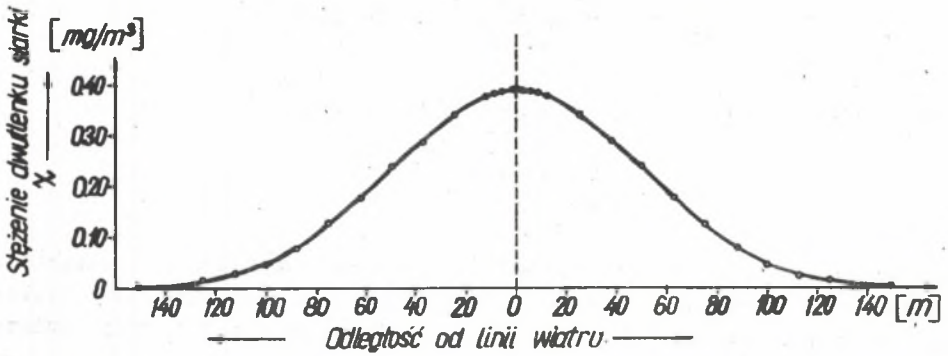
W końcu, na podstawie wzorów: (6) i (7), przelicza się odczytane odległości i stężenia bezwymiarowe na odpowiednie wartości bezwzględne. Tok tych obliczeń zestawiono w tablicy 2.

Otrzymany wynik przedstawiono graficznie na rys. 1.

Tablica 2

Tok obliczeń stężeń dwutlenku siarki jako funkcji odległości od emitora w kierunku poziomym, prostopadłym do linii wiatru

Odczyt z tablicy 1		Wielkości obliczone	
P_y	P_s	y [m]	[mg SO_2/m^3]
0	0,824	0	0,39
0,05	0,823	2,5	0,39
0,10	0,820	5,0	0,39
0,25	0,799	12,5	0,38
0,50	0,728	25,0	0,34
0,75	0,625	37,5	0,29
1,00	0,500	50,0	0,24
1,25	0,377	62,5	0,18
1,50	0,262	75,0	0,13
1,75	0,177	87,5	0,08
2,00	0,112	100,0	0,05
2,25	0,0654	112,5	0,03
2,50	0,0362	125,0	0,02
3,00	0,0092	150,0	0,004
3,50	0,0017	175,0	0,001
4,00	0,0001	200,0	0,000



Rys. 1. Profil stężeń dwutlenku siarki w przyziemnej warstwie powietrza, w kierunku prostopadłym do linii wiatru (graficzne przedstawienie wyników obliczeń)

Oznaczenia

C_y $[m^{n/2}]$ - Współczynnik dyfuzji w kierunku osi y,

C_z $[m^{n/2}]$ - Współczynnik dyfuzji w kierunku osi z,

E [mg/sek] - emisja zanieczyszczenia,

e - podstawa logarytmów naturalnych,

H [m] - wysokość wyrzutu emisji,

n - wykładnik meteorologiczny,

P_s - stężenie bezwymiarowe,

P_y - odległość bezwymiarowa w kierunku osi y,

P_x - odległość bezwymiarowa w kierunku osi x,

u [m/sek] - średnia prędkość wiatru między poziomem terenu a wysokością wyrzutu emisji,

x [m] - odległość od podstawy emitora, mierzona w kierunku poziomym, zgodnie z kierunkiem wiatru,

y [m] - odległość od podstawy emitora, mierzona w kierunku poziomym, prostopadle do kierunku wiatru,

X $[mg/m^3]$ - stężenie zanieczyszczenia gazowego w powietrzu

X_{max} $[mg/m^3]$ - maksymalne stężenie zanieczyszczenia gazowego w przyziemnej warstwie powietrza.

LITERATURA

[1] FALK L.L. - et al: Development of a system for predicting dispersion from stacks Air Repair 4, 87 1954.

[2] SUTTON O.G. - Micrometeorology, Mc. Graw Hill, New York 1953.

S t r e s z c z e n i e

Na podstawie bezwymiarowej postaci równania Suttona opracowano tablice funkcji $P_s = \frac{e}{P_x} \exp\left(-\frac{P_y^2 + 1}{P_x}\right)$ przeznaczone do wyznaczania profilów stężeń gazowych zanieczyszczeń w przyziemnej warstwie atmosfery, położonej w

pobliżu punktowego źródła emisji. Zastosowanie opracowanych tablic zilustrowano przykładem obliczeń.

ВЫЧИСЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ГАЗОВЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ВОЗДУХА В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

Р е з ю м е

На основе безразмерной формы уравнения Сэттона обработано таблицы функции $P_s = \frac{e}{P_x} \exp\left(-\frac{P_y^2+1}{P_x}\right)$ на основе которых возможно удобное опеределение размещения концентраций газовых загрязнений в приземном слое атмосферы вблизи индивидуального точечного источника загрязнения. Приведён числовой пример применения представленных таблиц.

THE EVALUATION OF CONCENTRATION PROFILES OF GASEOUS AIR POLLUTANTS IN THE GROUND LAYER, IN THE VICINITY OF A POINT SOURCE OF EMISSION

S u m m a r y

Tables of the exponential function $P_s = \frac{e}{P_x} \exp\left(-\frac{P_y^2+1}{P_x}\right)$ developed on the basis of the dimensionless form of Sutton's equation are provided for evaluation of the gaseous pollutant concentration profiles in the atmospheric layer near the ground and in the vicinity of a point source of emission. the use of the tables was illustrated by a numerical example.