

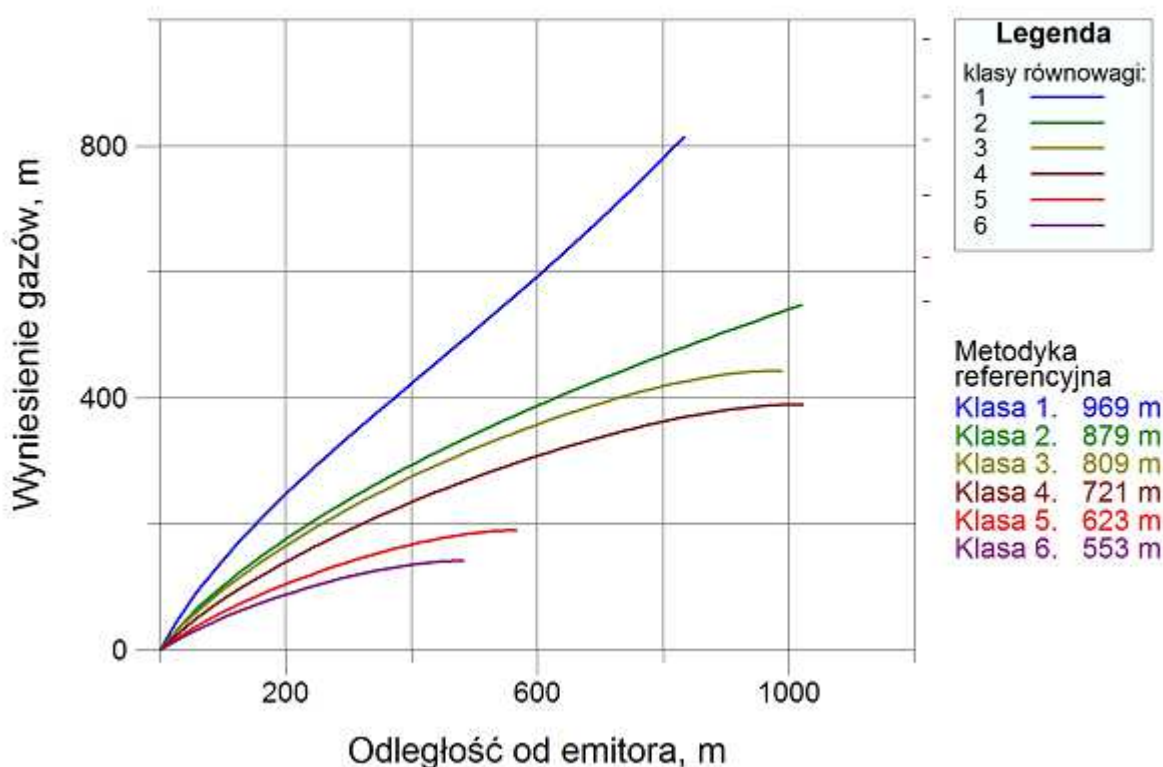
I. Metodyka stosowana w module „Chłodnie Kominowe” do pakietu „Operat FB” do obliczeń dyspersji zanieczyszczeń w powietrzu z chłodni kominowych

Obliczenia stężeń zanieczyszczeń w powietrzu są wykonywane zgodnie z metodyką referencyjną zawartą w rozporządzeniu „o wartościach odniesienia niektórych substancji w powietrzu” za wyjątkiem etapu obliczania wyniesienia spalin.

Obliczenia wyniesienia spalin odprowadzanych poprzez chłodnię kominową jest obliczane wg. metody M.Schatzmana i A.J. Policastro, w której wyniesienie gazów jest funkcją odległości od emitora , a więc jest zmienne w odróżnieniu od metodyki referencyjnej.

W obliczeniu wyniesienia są uwzględniane wymiary chłodni kominowej, temperatura i prędkość gazów, wilgotność spalin i zawartość mgły wodnej oraz warunki meteorologiczne.

Przykład zależności wyniesienia gazów od odległości



Metodyka obliczania wyniesienia jest zawarta w normie niemieckiej VDI 3784 „Ausbreitung von Emissionen aus Naturzug-Naßkühltürmen; Beurteilung von Kühlturmauswirkungen”.

Pakiet Operat oblicza wyniesienie n za pomocą biblioteki procedur matematycznych w Fortranie dołączonych do normy CDI 3784.

W pakiecie znajdują się narzędzia do testowania i walidacji obliczeń.

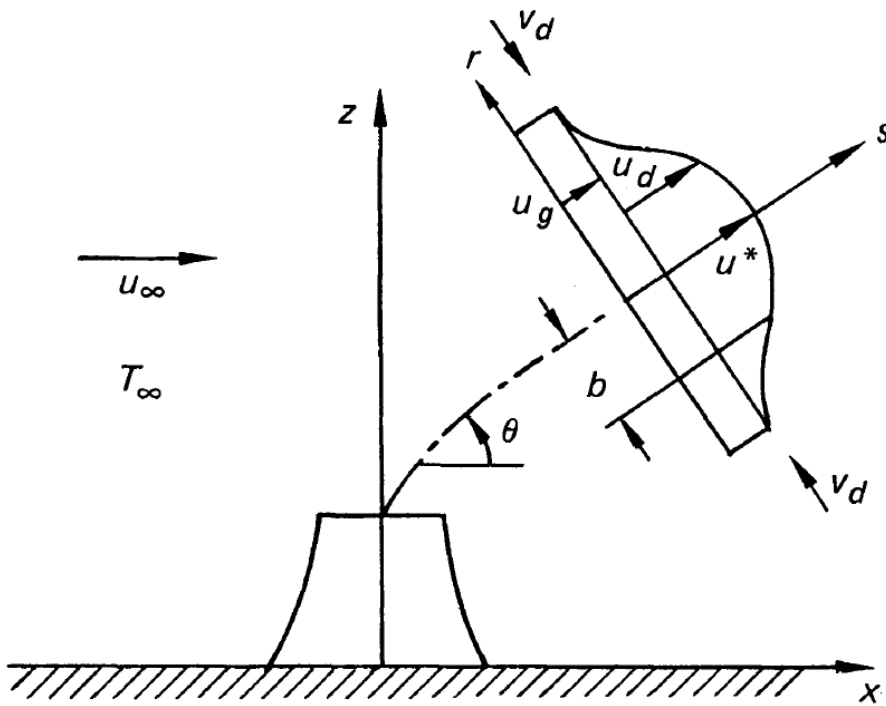
Obliczenia wyniesienia spalin przez chłodnię kominową opierają się na następujących założeniach i wzorach:

$$\frac{d}{ds} \int_0^R u_d r dr = E$$

$$\frac{d}{ds} \int_0^R u_d (u_g + u_d) r dr = - \int_0^R \frac{\rho_d}{\rho_0} g r dr \sin \theta$$

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{- \int_0^R \frac{\rho_d}{\rho_0} g r dr \cos \theta - \frac{1}{2} u_\infty E \sin \theta - \frac{\sqrt{2}}{2\pi} c_D b u_\infty^2 \sin^2 \theta}{\int_0^R u_d (u_g + u_d) r dr}$$

$$\frac{d}{ds} \int_0^R c_d (u_g + u_d) r dr = - \frac{dc_\infty}{ds} \int_0^R (u_g + u_d) r dr$$



s, r, ϕ - współrzędne krzywoliniowe

x, y, z - współrzędne w układzie Kartezjańskim

u_∞ - prędkość wiatru

u_g - składowa prędkości wiatru w kierunku s

u_d - lokalne przekroczenia wartości składowej prędkości w kierunku s

u^* - wartość maksymalna składowej prędkości s (w osi strumienia)

c - stężenie zanieczyszczeń

T - temperatura

ρ - gęstość (ρ_0 - gęstość odniesienia)

θ - kąt nachylenia osi strumienia w odniesieniu do poziomu

R - promień strugi $R = \sqrt{2b}$

b - normalna szerokość strumienia (standardowe odchylenie od rozkładu Gaussa)

E - lokalny współczynnik wciągania masy z otoczenia $E = -v_d(R)$

c_D - współczynnik oporu funkcji ciśnienia

∞ - wartość otoczenia

* - wartość w osi strumienia

$$\frac{d}{ds} \int_0^R q_d (u_g + u_d) r dr = - \frac{dq_x}{ds} \int_0^R (u_g + u_d) r dr - \int_0^R \frac{R_c}{\rho_0} r dr$$

$$\frac{d}{ds} \int_0^R \sigma_d (u_g + u_d) r dr = - \frac{d\sigma_\infty}{ds} \int_0^R (u_g + u_d) r dr + \int_0^R \frac{R_c}{\rho_0} r dr$$

$$Q = L \cdot R_c$$

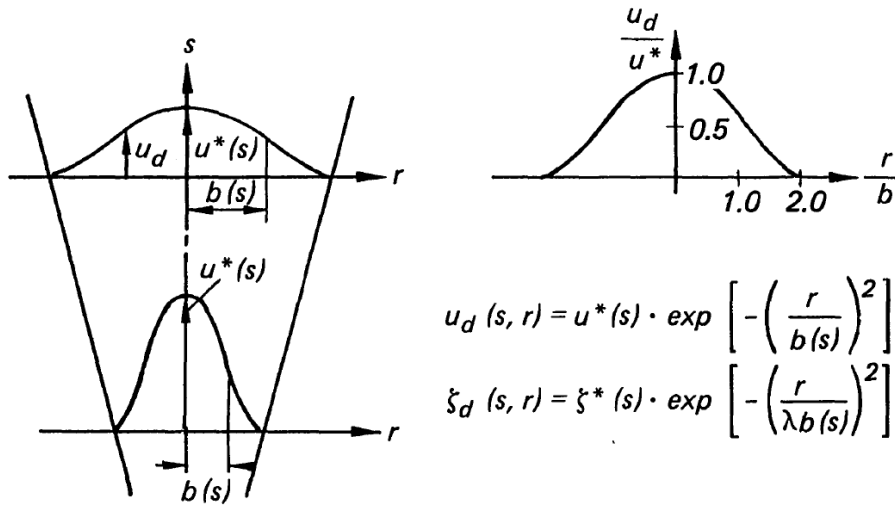
$$\zeta = q + \sigma$$

$$\frac{d}{ds} \int_0^R \zeta_d (u_g + u_d) r dr = - \frac{d\zeta_d}{ds} \int_0^R (u_g + u_d) r dr$$

$$\frac{d}{ds} \int_0^R T_d (u_g + u_d) r dr = - \left(\frac{dT_\infty}{dz} + \frac{g}{c_p} \right) \sin \theta \int_0^R (u_g + u_d) r dr$$

$$\frac{d}{ds} \int_0^R T_d (u_g + u_d) r dr = - \left(\frac{dT_\infty}{dz} + \frac{g}{c_p} \right) \sin \theta \int_0^R (u_g + u_d) r dr + \int_0^R \frac{Q}{\rho_0 c_p} r dr$$

$$\frac{d}{ds} \int_0^R \left(T_d + \frac{L}{c_p} q_d \right) (u_g + u_d) r dr = - \left(\frac{dT_\infty}{dz} + \frac{g}{c_p} + \frac{L}{c_p} \frac{dq_\infty}{dz} \right) \sin \theta \int_0^R (u_g + u_d) r dr$$

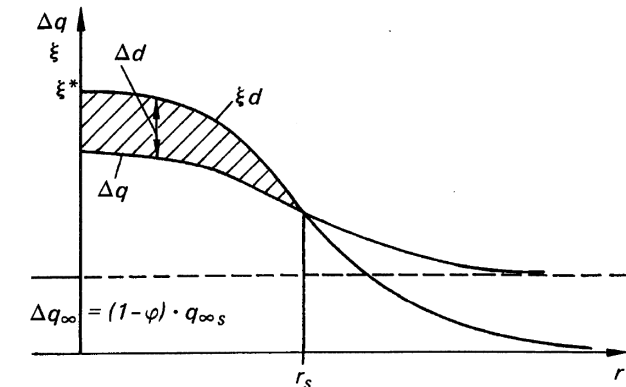


$$u_d(s, r) = u^*(s) \cdot \exp \left[- \left(\frac{r}{b(s)} \right)^2 \right]$$

$$\zeta_d(s, r) = \zeta^*(s) \cdot \exp \left[- \left(\frac{r}{\lambda b(s)} \right)^2 \right]$$

$$\frac{dp_{vs}}{dT} = L \frac{P_{vs}}{R_v T^2}$$

$$\Delta q(s, r) = q_{\infty s} \left[1 - \phi_\infty + \frac{L}{R_v T_\infty^2} \frac{T_d}{1!} + \left(\frac{L}{R_v T_\infty^2} \right)^2 \left(\frac{T_d}{2!} \right)^2 + \dots \right]$$



$$\zeta_d(s, r) = \Delta q(s, r)$$

$$\zeta_d(s, r) = \zeta^*(s) \cdot \exp\left[-\left(\frac{r}{\lambda b(s)}\right)^2\right]$$

$$u_d(s, r) = u^*(s) \cdot \exp\left[-\left(\frac{r}{b(s)}\right)^2\right]$$

$$\varepsilon = \frac{E}{u^* b} = \frac{A_1 + A_2 / F_D^2}{1 + 0,5 A_3 \frac{u_\infty}{u^*} \cos \theta} \left(1 + A_4 \frac{u_\infty}{u^*} \sin \theta\right)$$

$$c_{DW} = const \cdot \ln\left[1 + \frac{4 u_\infty / u_j^*}{1 + 1 / \sqrt{F_D}}\right] \text{ gdzie: } const=1 \text{ dla } Re_\infty < 2 \cdot 10^5$$

$$const = \frac{1}{3} \text{ dla } Re_\infty \geq 2 \cdot 10^5$$

II. Wprowadzanie danych do modułu „Chłodnie Kominowe” w pakiecie „Operat FB”

Obliczenia stężeń zanieczyszczeń w powietrzu są wykonywane zgodnie z metodyką referencyjną zawartą w rozporządzeniu „o wartościach odniesienia niektórych substancji w powietrzu” za wyjątkiem etapu obliczania wyniesienia spalin.

Obliczenia wyniesienia spalin odprowadzanych poprzez chłodnię kominową jest obliczane wg. metody M.Schatzmana i A.J. Policastro, w której wyniesienie gazów jest funkcją odległości od emitora, a więc jest zmienne w odróżnieniu od metodyki referencyjnej.

W obliczeniu wyniesienia są uwzględniane wymiary chłodni kominowej, temperatura i prędkość gazów, wilgotność spalin i zawartość mgły wodnej oraz warunki meteorologiczne.

Metodyka obliczania wyniesienia jest zawarta w normie niemieckiej VDI 3784 „Ausbreitung von Emissionen aus Naturzug-Naßkühltürmen; Beurteilung von Kühlturmauswirkungen”.

Moduł „Chłodnie kominowe” został opracowany na podstawie biblioteki procedur matematycznych w Fortranie dołączonych do powyższej normy.

Uwaga 1: w normie VDI 3784 są stosowane klasy równowagi atmosfery Kluga Maniera I..V. Klasy Kluga Maniera zostały zamienione na klasy Pasquilla wg. następującej zasady:

Klug Manier	Pasquill
V	1 (A)
IV	2 (B)
III.2	3 (C)

III.1	4 (D)
2	5 (E)
1	6 (F)

Sposób zamiany klas jest opisany w „Micrometeorology” Thomas Foken. Springer. 2006.

Obliczenia wyniesienia są całkowicie zgodne z normą VDI 3784. W programie zawarty jest program narzędziowy test_vdisp.exe do testowania zgodności z normą, zawierający także raport z walidacji modułu.

Uwaga 2. Wyniesienie nie jest obliczane w przypadku liczby Frouda poniżej 0,35
Liczba Frouda zależy m.in. od prędkości wylotowej gazów i temperatury.

Uwaga 3. Wyniesienie wzrasta z odległością do pewnej granicy, dla klasy 1 i 2 jest to 1100 m, dla dalszych jest to 800 m. W dalszej odległości wyniesienie jest stałe.

Wprowadzanie danych emitora

W przypadku chłodni kominowych należy włączyć w oknie danych emitora opcję „Chłodnia kominowa”

Okres	1 - sezon grz	2 - sezon letn
Prędkość gazów, m/s	5,2	5,2
Temperatura gazów, K	309	312
Wilgotność względna, %	100	97
Zawartość ciekłej wody, kg/kg	0,03	0,03

Wtedy będzie można wpisać wilgotność gazów i zawartość ciekłej wody (mgły wodnej) w poszczególnych okresach. Jeśli parametry emitora są stałe lub występuje jeden okres można włączyć opcję „Stała prędkość i temperatura gazów”.

Na wydrukach obliczeń stężeń maksymalnych będzie podawana wilgotność gazów oraz wyniesienia dla odległości, w której występuje maksymalne stężenie.

Na wydruku danych do obliczeń stężeń w sieci receptorów będzie dodana tabela wyniesienia gazów w różnych odległościach.

Dane emitorów punktowych

Symbol	Wysokość emitora	Średnica emitora	Prędkość gazów	Temperatura gazów	Maksymalne wyniesienie gazów	Ciepło wł. gazów	Szorstkość terenu	Usytuowanie emitora	
	[m]	[m]	[m/s]	[K]	[m]	[kJ/m³/K]	[m]	X [m]	Y [m]
E-1	130	65	20	309	1105	1,30	0,5	0	0

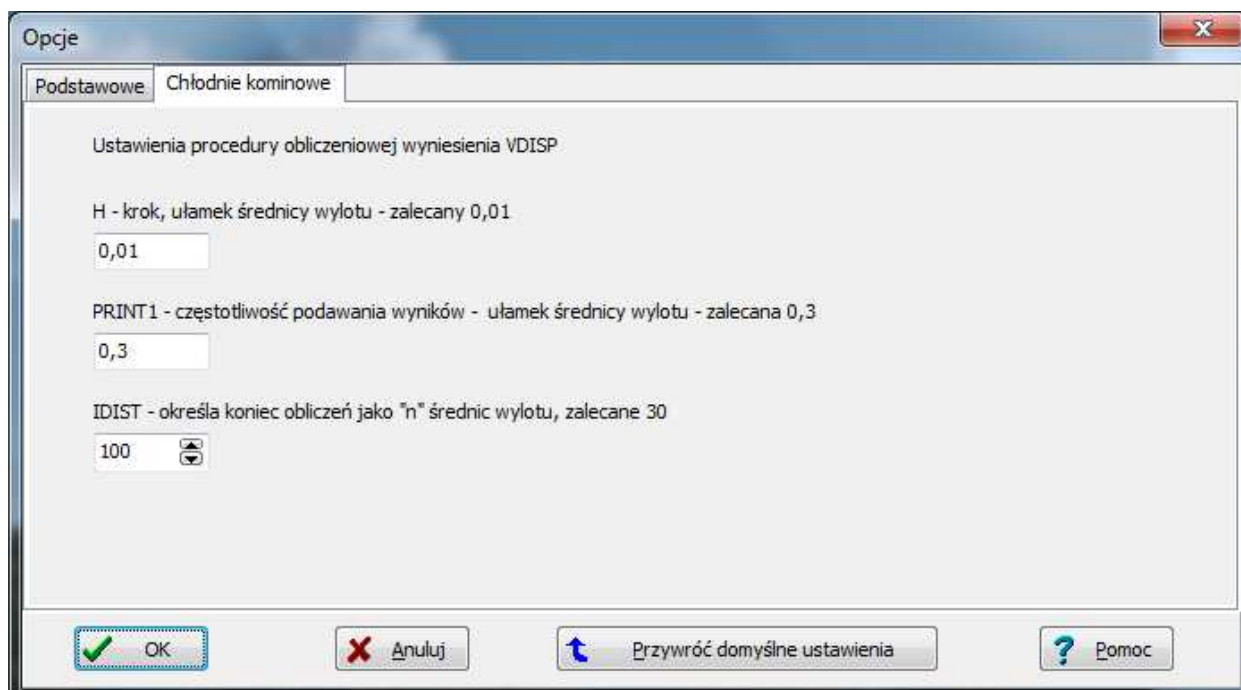
Zestawienie wyniesienia gazów w różnych odległościach od emitora

E-1 Weża chłodnicza 1 okres

Stan równ. atmos.	Prędkość wiatru m/s	Odległość od emitora, m											
		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	
1	1	697	1104	1104	1104	1104	1104	1104	1104	1104	1104	1104	1104
2	1	477	799	1048	1105	1105	1105	1105	1105	1105	1105	1105	1105
3	1	445	737	802	802	802	802	802	802	802	802	802	802
4	1	370	611	797	804	804	804	804	804	804	804	804	804
5	1	271	412	484	493	493	493	493	493	493	493	493	493
6	1	229	331	358	358	358	358	358	358	358	358	358	358
1	2	317	542	738	921	1098	1101	1101	1101	1101	1101	1101	1101

Opcje obliczeń

W menu Opcje/Opcje obliczeń można zmodyfikować ustawienia obliczeń wyniesienia



Znaczenie opcji:

Symbol w procedurze VDISP	
H	Skok obliczeniowy , ułamek średnicy wylotu wieży- zalecany 0,01
PRINT1	Skok podawania wyników, ułamek średnicy - zalecany 0,3
IDIST	Zakres wyników - liczba średnic, zalecana 30. Uwaga: ponieważ zgodnie z VDI zakres zmienności wyniesienia wynosi max. 1100 m , iloczyn średnicy i IDIST nie może być mniejszy niż 1100 m. W przypadku gdy jest mniejszy program sam wyliczy IDIST.

III. Walidacja obliczeń wyniesienia

Wydruk z programu narzędziowego do testowania i walidacji modułu test_Vdisp.exe

walidacja modułu "wieże chłodnicze" do pakietu "Operat FB" dla windows © Ryszard Samoć, służącego do obliczania wyniesienia gazu metodą: Michael Schatzmann, Anthony J. Policastro(1984) "An advanced integral model for cooling Tower plume dispersion". Atmospheric Environment, Vol.18, Pp. 663-674.

Dane wejściowe:

```
65.0  130.0  4.1   36.0  100.0  0.003
 9.0   3.2   0.01  0.3   30
```

Oryginalne wyniki obliczeń VDISP:

: VDI PLUME 1 A :

```
-----  
: DM    = 65.00  UJMS = 4.1   TJC = 36.0  PHIJP = 100.0:  
: SIGJ  = 0.003  URMS = 9.0   HM  = 130.0  H    = 0.010:  
: PRINT1= 0.300  IDIST= 30   KLIST= 2    AK   = 3.200:  
: FRD   = 0.494  
-----
```

```
-----  
DISTANCE X(M)          PLUME RISE UE(M)  
0.0                    0.0  
18.8                   5.1  
37.6                   10.5  
56.3                   15.8  
.  
.  
844.6                 137.5  
864.1                 137.6  
870.6                 137.6  
-----
```

=====
wynik obliczeń z programu:

odległość [m]	wyniesienie [m]	
0,0	0,0	zgodne
18,8	5,1	zgodne
37,6	10,5	zgodne
56,3	15,8	zgodne
75,1	21,0	*
94,0	26,0	*
112,8	30,9	*
131,7	35,7	*
150,7	40,3	*
169,7	44,8	*
188,7	49,2	*
207,7	53,4	*
226,7	57,6	*
245,8	61,6	*
264,9	65,5	*
284,1	69,3	*
303,2	73,0	*
322,4	76,7	*
341,5	80,2	*
360,7	83,7	*
379,9	87,0	*
399,2	90,3	*
418,4	93,6	*
437,6	96,7	*
456,9	99,8	*
476,1	102,8	*
495,4	105,7	*

514,7	108,6	*
534,0	111,4	*
553,3	114,1	*
572,7	116,7	*
592,0	119,2	*
611,3	121,6	*
630,7	124,0	*
650,1	126,2	*
669,5	128,3	*
688,9	130,3	*
708,3	132,1	*
727,7	133,7	*
747,2	135,0	*
766,6	136,0	*
786,1	136,7	*
805,6	137,1	*
825,1	137,4	*
844,6	137,5	zgodne
864,1	137,6	zgodne
870,6	137,6	zgodne

* - oznacza odległości nie ujęte w przykładowych obliczeniach VDISP

wynik walidacji: dane są zgodne

IV. Walidacja obliczeń stężeń

Stężenia zanieczyszczeń w powietrzu zgodnie z metodyką referencyjną zawartą w rozporządzeniu „o wartościach odniesienia niektórych substancji w powietrzu” są obliczane bez etapu obliczenia wyniesienia gazów.

Wyniesienie spalin odprowadzanych poprzez chłodnię kominową jest obliczane wg. metody M.Schatzmana i A.J. Policastro, i jest funkcją odległości od emitora, a więc jest zmienne w odróżnieniu od metodyki referencyjnej.

Metodyka obliczania wyniesienia jest zawarta w normie niemieckiej VDI 3784 „Ausbreitung von Emissionen aus Naturzug-Naßkühltürmen; Beurteilung von Kühlturmauswirkungen”. W obliczeniu wyniesienia są uwzględniane wymiary chłodni kominowej, temperatura i prędkość gazów, wilgotność spalin i zawartość mgły wodnej oraz warunki meteorologiczne.

Wyniesienie gazów jest zależne od klasy równowagi atmosfery i wzrasta z odległością do pewnej granicy. W dalszej odległości wyniesienie jest stałe.

W celu sprawdzenia obliczeń w pakiecie „Operat FB” przeprowadzono następujący test walidacyjny dla jednego zanieczyszczenia.

Zanieczyszczenia są emitowane z emitora o średnicy 50 m i wysokości 120 m.

Gazy wylatują z prędkością 3 m/s i mają temperaturę 300 K. Emisja maksymalna dla jednego z zanieczyszczeń wynosi 450 kg/h czyli 125 000 mg/s w odległości 5000 m od emitora. Do obliczeń przyjęto szorstkość terenu równą 0,5 oraz 3 klasę równowagi atmosfery

1. Odczytanie wyniesienia gazów z podprogramu „Stężenia w sieci receptorów” w pakiecie „Operat FB”.

Stan równ. atmos.	Prędkość wiatru m/s	Odlegość od emitora, m										
		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
1	1	264,5	449,2	656,0	821,4	821,4	821,4	821,4	821,4	821,4	821,4	821,4
2	1	181,7	282,2	353,8	403,7	432,2	438,0	438,0	438,0	438,0	438,0	438,0
3	1	170,0	259,2	315,0	341,7	343,4	343,4	343,4	343,4	343,4	343,4	343,4
4	1	143,9	220,7	271,7	303,5	314,8	314,8	314,8	314,8	314,8	314,8	314,8
5	1	104,0	142,2	184,7	221,7	244,7	254,7	254,7	254,7	254,7	254,7	254,7

Jak wynika z tabeli dla 3 klasy równowagi atmosfery wyniesienie gazów jest stałe od odległości emitora równej 500 m i wynosi 343,4 m. Wobec tego dla odległości 5000 m od emitora przyjmujemy takie samo wyniesienie.

$$\Delta H = 343,4 \text{ m}$$

2. Obliczenie pozornej wysokości emitora na podstawie wyniesienia gazów.

$$H = h + \Delta H$$

gdzie:

h – geometryczna wysokość emitora liczona od poziomemu terenu, m

ΔH – wyniesienie gazów odlotowych, m

$$H = 463,4 \text{ m}$$

3. Obliczenie średniej prędkości wiatru w warstwie od geometrycznej wysokości emitora h do efektywnej wysokości emitora H .

$$\bar{u} = \frac{u_a}{(H - h) \times 14^m} \times \left[\frac{(300^{1+m} - h^{1+m})}{(1 + m)} + (H - 300) \times 300^m \right]$$

gdzie:

u_a – prędkość wiatru na wysokości anemometru, m/s (dla 3 klasy wynosi 1 m/s)

H – pozorna wysokość emitora, m

h - geometryczna wysokość emitora liczona od poziomemu terenu, m

m – stała zależna od stanu równowagi atmosfery (dla 3 klasy wynosi 0,196)

–
 $u = 1,754 \text{ m/s}$

4. Obliczenie współczynnika poziomej i pionowej dyfuzji atmosferycznej.

Współczynnik poziomej dyfuzji atmosferycznej

$$\sigma_y = A \times x^a$$

Współczynnik pionowej dyfuzji atmosferycznej

$$\sigma_z = B \times x^b$$

gdzie:

A – współczynnik obliczany ze wzoru:

$$A = 0,088 \times \left(6m^{-0,3} + 1 - \ln \frac{H}{z_o} \right)$$

$$A = 0,348$$

B – współczynnik obliczany ze wzoru:

$$B = 0,38m^{1,3} \times \left(8,7 - \ln \frac{H}{z_o} \right)$$

$$B = 0,085$$

a, b – stałe zależne od stanu równowagi atmosfery (dla 3 klasy a = 0,845, b = 0,978)

x – składowa odległości emitora od punktu, dla którego dokonuje się obliczeń, równoległa do kierunku wiatru, m

z_o – średnia wartość współczynnika aerodynamicznej szorstkości terenu na obszarze objętym obliczeniami, m

$$\sigma_y = 464,4$$

$$\sigma_z = 353,8$$

5. Obliczenie stężenia zanieczyszczenia uśrednionego dla jednej godziny.

$$S_{xyz} = \frac{E_g}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \cdot 1000, [\mu\text{g} / \text{m}^3]$$

gdzie:

E_g – maksymalna emisja substancji gazowej, mg/s

u – średnia prędkość wiatru w warstwie od geometrycznej wysokości emitora h do efektywnej wysokości emitora H , m/s

σ_y – współczynnik poziomej dyfuzji atmosferycznej, m

σ_z – współczynnik pionowej dyfuzji atmosferycznej, m

y – składowa odległości emitora od punktu, dla którego dokonuje się obliczeń, prostopadła do kierunku wiatru

z – wysokość, dla której oblicza się stężenie substancji w powietrzu, m = 0

H – efektywna wysokość emitora, m

Założenie:

Składowa odległości emitora od punktu, dla którego dokonuje się obliczeń, prostopadła do kierunku wiatru czyli y jest równa zero.

Stąd

$$\exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) = 1$$

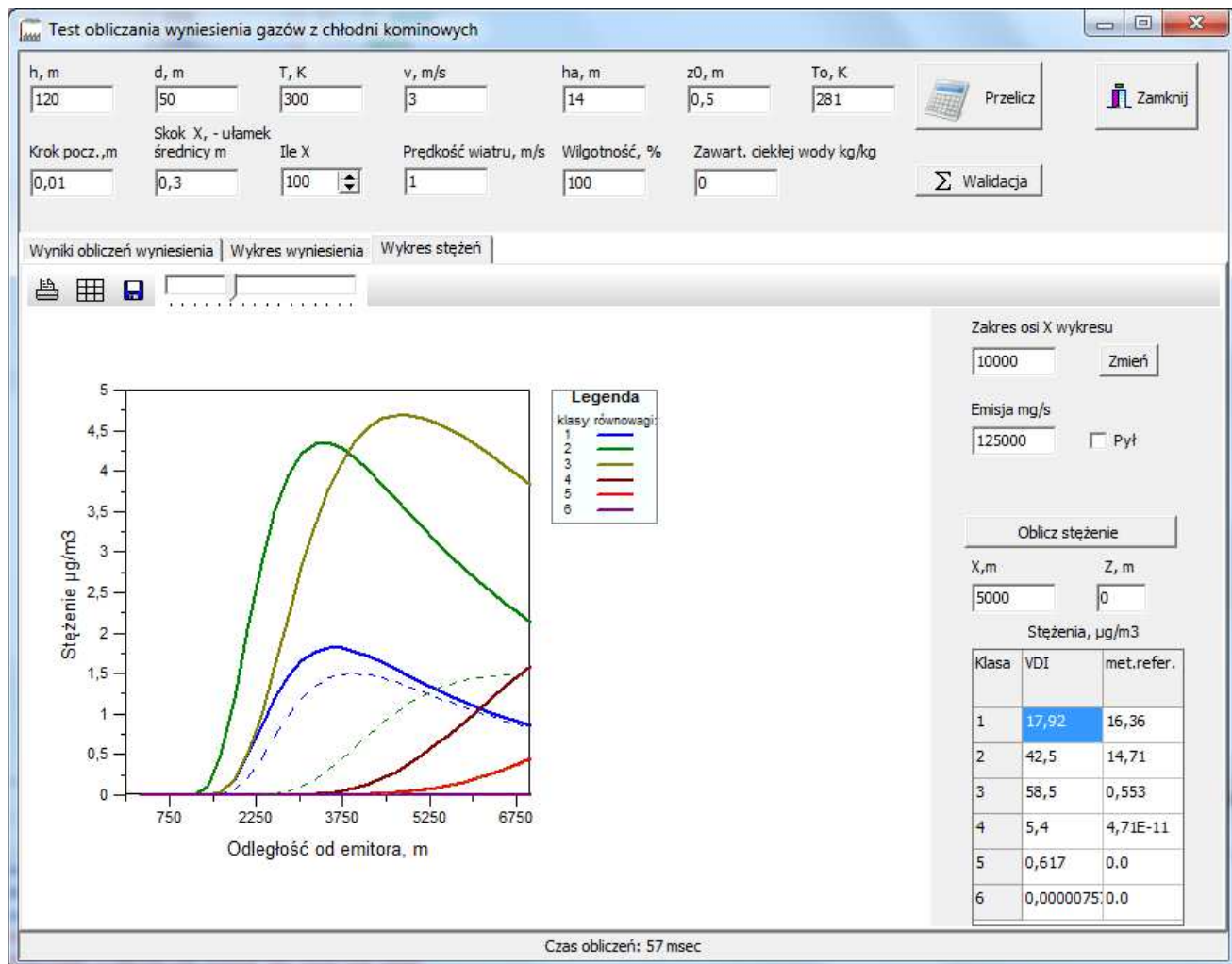
bo $\exp(0) = 1$

zatem

$$S_{xyz} = \frac{E_g}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \left\{ \exp\left[-\frac{(Z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(Z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \times 1000$$

$$S_{xyz} = 58,55$$

Wyniki obliczeń z programu narzędziowego do testowania i walidacji modułu „Chłodnie Kominowe”



Wyniki obliczeń z pakietu „Operat FB” - fragment

L.p.	X, m	Y, m	Stężenie max µg/m ³	Stężenie średnie µg/m ³	Częstość przekroc.D1, %	Kryt. stan równowagi	Kryt. prędkość wiatru m/s	Kryt. kierunek wiatru
850	4500	0	57,971	0,5335	0,00	3	1	W
851	5000	0	58,232	0,5047	0,00	3	1	W
852	5500	0	56,642	0,4758	0,00	3	1	W

Uwaga: w celu przyspieszenia obliczeń, do stężeń w sieci receptorów przyjmowane są stabilaryzowane współczynniki dyfuzji – stąd ok. 0,46 % różnica między dokładnymi obliczeniami.