

РАСЧЕТ РАССЕЙВАНИЯ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ ВСЛЕДСТВИЕ РАБОТЫ ОДИНОЧНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ИСТОЧНИКА

© 2012 А.В. Терещенко

Самарский государственный аэрокосмический университет имени акад. С.П. Королева
(национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 29.09.2011

В данной статье предлагается вариант методики расчета концентрации вредных веществ в приземном слое при выбросах одиночным источником предприятия на основе ОНД-86. Для упрощения алгоритма расчетов и программирования большинство групп уравнений заменяются путем аппроксимации одним уравнением. Погрешность предложенного варианта расчета менее 5%, что вполне устраивает практику расчетов.

Ключевые слова: высота источника, максимальная концентрация, скорость ветра, перепад температуры, расстояние до максимума концентрации, аппроксимация.

Методика ОНД-86 [1] представляет собой фундаментальный труд, разработанный большой группой ученых самых разных научных направлений и специальностей. Известные на сегодня работы [2-6] и др. основаны на формулах ОНД-86 без каких-либо модификаций. В интернете новых разработок нет. В представляемой работе производится упрощение алгоритма ОНД-86 сокращением количества расчетных формул, примеры расчетов и выводы.

1. По ОНД-86 [1] максимальная приземная концентрация вредного вещества определяется уравнением:

$$C_m = \frac{AMFm\eta}{H^2 \sqrt[3]{V_1 \Delta T}}, \quad (1)$$

где: A – коэффициент, зависящий от климата и широты данной местности ($A=140-250$);

M – масса вредного вещества, выбрасываемого в атмосферу в единицу времени одиночным промышленным источником (трубой), [г/с];

F – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания вредных веществ в атмосферном воздухе ($F=1-3$);

m и η – коэффициенты, учитывающие условия выхода газо-воздушной смеси из устья источника выброса;

H – высота источника выброса (трубы) над уровнем земли [м];

η – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности, в случае ровной или слабопересеченной местности с перепадом высот, не превышающим 50 м на 1 км, $\eta=1$;

ΔT – разность между температурой выбрасываемой газо-воздушной смесью и температурой окружающего атмосферного воздуха [$^{\circ}\text{C}$];

V_1 – расход газо-воздушной смеси, определяемый по формуле:

$$V_1 = \frac{\pi D^2}{4} \omega_0, \quad (2)$$

где: D – диаметр устья источника выброса [м],
 ω_0 – скорость выхода смеси из устья источника.

Дополнительно U_B – скорость ветра, [м/с].

В работе приняты понятия: холодные выбросы источника – когда температура вредных выбросов близка к температуре атмосферного воздуха и эта разница при расчетах принята в пределах $1-5^{\circ}\text{C}$, горячие выбросы – когда температура выбросов превышает температуру атмосферы более 5°C .

2. В ОНД коэффициенты m и η определяются в зависимости от параметров:

$$f = 1000 \frac{\omega_0^2 D}{H^2 \Delta T}, \quad (3)$$

$$v_m = 0,65 \sqrt[3]{\frac{V_1 \Delta T}{H}}, \quad (4)$$

$$v'_m = 1,3 \frac{\omega_0 D}{H}, \quad (5)$$

$$f_e = 800 (v'_m)^3. \quad (6)$$

3. По ОНД коэффициент m в зависимости от f определяется по формулам:

$$\text{при } f < 100 \quad m = \frac{1}{0,67 + 0,1\sqrt{f} + 0,34\sqrt[3]{f}} \quad (7)$$

Терещенко Анатолий Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Экология и безопасность жизнедеятельности». E-mail: anat.Krickunov@yandex.ru.

$$\text{при } f \geq 100 \quad m = \frac{1,47}{\sqrt[3]{f}}. \quad (8)$$

При программировании, если параметр $f < 100$, то коэффициент m вычисляется по формуле (7), если $f \geq 100$, то по формуле (8). Здесь и ниже в ОНД-86 в программе таких условных команд “если” очень много. Когда в программе их много, то высока вероятность ошибки. В связи с этим уходит много времени на поиск и устранение ошибок, поэтому предпочтительней было бы иметь прямой расчет с минимальным количеством команд “если”.

С целью упрощения процедуры программирования и расчетов два диапазона по формулам (7), (8) для $0,001 \leq f \leq 2000$ заменяем с погрешностью до 3% одним приближенным уравнением:

$$m = 0,65 f^{-0,185} (10^B), \quad (9)$$

где $B = \mathcal{J}_0 + \mathcal{J}_1$,

$$\mathcal{J}_0 = 0,0008 (\lg f)^4 - 0,0015 (\lg f)^3$$

$$\mathcal{J}_1 = -0,0397 (\lg f)^2 + 0,034 (\lg f) + 0,141$$

По формуле (9) имеем возможность выполнять прямые расчеты коэффициента m в широком диапазоне параметра f без условных команд “если” по принципу “X подставил Y получил”.

Если $f_e < f < 100$ значение коэффициента m вычисляется при $f = f_e$.

4. По ОНД коэффициент n при $f < 100$ определяется в зависимости от v_m по формулам:

$$n = 1 \quad \text{при } v_m \geq 2, \quad (10)$$

$$n = 0,532 v_m^2 - 2,13 v_m, \quad (11)$$

при $0,5 \leq v_m < 2$

$$n = 4,4 v_m \quad \text{при } v_m < 0,5. \quad (12)$$

По аналогии с предыдущим заменяем с погрешностью до 5% все диапазоны формул (10) – (12) для $0,1 \leq v_m \leq 10$ одним приближенным уравнением:

$$n = 10^{B_1}, \quad \text{где } B_1 = A_1 + A_2 + A_3 + A_4, \quad (13)$$

$$A_1 = 0,612 (\lg v_m)^6 - 1,181 (\lg v_m)^5$$

$$A_2 = -0,702 (\lg v_m)^4 + 1,977 (\lg v_m)^3,$$

$$A_3 = -0,276 (\lg v_m)^2 - 0,624 (\lg v_m),$$

$$A_4 = 0,185.$$

3. Для $f \geq 100$ или $\Delta T \approx 0$ (в программе $1 < \Delta T \leq 5^\circ C$) и $v_m \geq 0,5$ (холодные выб-

росы, при которых температура выбрасываемой смеси превышает температуру атмосферного воздуха не более, чем на $5^\circ C$) при расчета C_m вместо формулы (1) используется формула (14)

$$C_m = \frac{A M F n \eta}{H^{4/3}} K,$$

$$\text{где } K = \frac{D}{8 V_1} = \frac{1}{7,1 \sqrt{\omega_0 V_1}}, \quad (14)$$

а n вычисляется по формуле (13)

$$\text{при } v_m = v'_m.$$

4. При $f < 100$ и $v_m < 0,5$ или $f \geq 100$ и $v'_m < 0,5$ (случаи предельно малых скоростей ветра) максимум концентрации C_m вместо формулы (1) рассчитывается по формулам (15–17):

$$C_m = \frac{A M F m' \eta}{H^{7/3}}, \quad (15)$$

где: $m' = 2,86 m$ при $f < 100$, $v_m < 0,5$, (16)

$$m' = 0,9 \quad \text{при } f \geq 100, \quad v'_m < 0,5. \quad (17)$$

4. Расстояние X_m [м] от источника выбросов, на котором приземная концентрация C [мг/м³] достигает максимального значения C_m , определяется по формуле:

$$X_m = \frac{5-F}{4} d H, \quad (18)$$

где безразмерный коэффициент d при $f < 100$ (горячие выбросы) находится по формулам:

$$d = 2,48 (1 + 0,28 \sqrt[3]{f_e}) \quad \text{при } v_m \leq 0,5. \quad (19)$$

$$d = 4,95 v_m (1 + 0,28 \sqrt[3]{f}). \quad (20)$$

при $0,5 < v_m \leq 2$

$$d = 7 \sqrt{v_m} (1 + 0,28 \sqrt[3]{f}) \quad \text{при } v_m > 2. \quad (21)$$

Формулы (20, 21) заменяются с погрешностью до 5% без коэффициента K_1 для $0,5 < v_m \leq 10$ одним приближенным уравнением:

$$d = (B_2 + B_3) K_1, \quad (22)$$

$$B_2 = -0,0066 v_m^4 + 0,171 v_m^3 - 1,635 v_m^2$$

$$B_3 = 8,155 v_m - 1,556, \quad K_1 = (1 + 0,28 \sqrt[3]{f})$$

Таким образом, для расчета коэффициента d вместо трех формул (19–21) используется две формулы (19, 22).

При $f > 100$ или $\Delta T \approx 0$ ($1 \leq \Delta T \leq 5$) т.е. холодные выбросы, коэффициент d вычисляется по формулам:

$$d = 5,7 \text{ при } \mathbf{V}'_M \leq 0,5 \quad (23)$$

$$d = 11,4 \mathbf{V}'_M \text{ при } 0,5 < \mathbf{V}'_M \leq 2 \quad (24)$$

$$d = 16 \sqrt{\mathbf{V}'_M} \text{ при } \mathbf{V}'_M > 2 \quad (25)$$

Три формулы (23–25) для коэффициента d можно заменить с погрешностью до 5% одной формулой для $(0,1 \leq \mathbf{V}'_M \leq 10)$:

$$d = 10^{B_4}, \text{ где } B_4 = \mathcal{K}_2 + \mathcal{K}_3 + \mathcal{K}_4, \quad (26)$$

$$\mathcal{K}_2 = 0,755 (\lg \mathbf{V}'_M)^5 - 0,06 (\lg \mathbf{V}'_M)^4,$$

$$\mathcal{K}_3 = -1,295 (\lg \mathbf{V}'_M)^3 + 0,25 (\lg \mathbf{V}'_M)^2,$$

$$\mathcal{K}_4 = 1,021 (\lg \mathbf{V}'_M) + 1,046.$$

5. По ОНД-86 опасная скорость ветра U_m [м/с], при которой достигается максимум приземной концентрации вредных веществ (примерно 10 м от уровня земли) в случае $f < 100$ (горячие выбросы), определяется по формулам:

$$U_m = 0,5 \text{ при } \mathbf{V}'_M \leq 0,5, \quad (27)$$

$$U_m = \mathbf{V}'_M \text{ при } 0,5 < \mathbf{V}'_M \leq 2, \quad (28)$$

$$U_m = \mathbf{V}'_M (1 + 0,12\sqrt{f}) \text{ при } \mathbf{V}'_M > 2. \quad (29)$$

С целью упрощения формулы (27, 28) можно заменить для $0,1 \leq \mathbf{V}'_M \leq 2$ одним уравнением:

$$U_m = (L_1 + L_2 + L_3), \quad (30)$$

$$L_1 = 0,745 \mathbf{V}'_M^6 + 4,793 \mathbf{V}'_M^5 - 11,585 \mathbf{V}'_M^4,$$

$$L_2 = 12,655 \mathbf{V}'_M^3 - 5,448 \mathbf{V}'_M^2,$$

$$L_3 = 0,875 \mathbf{V}'_M + 0,458,$$

а диапазон для $\mathbf{V}'_M > 2$ рассчитывается по формуле (29).

6. Опасная скорость ветра U_m [м/с] в случае $f > 100$ или $\Delta T \approx 0$ (холодные выбросы) определяется по формулам:

$$U_m = 0,5 \text{ при } \mathbf{V}'_M \leq 0,5, \quad (31)$$

$$U_m = \mathbf{V}'_M \text{ при } 0,5 < \mathbf{V}'_M \leq 2, \quad (32)$$

$$U_m = 2,2 \mathbf{V}'_M \text{ при } \mathbf{V}'_M > 2. \quad (33)$$

Две формулы (31) и (32) заменяем для $0,1 \leq \mathbf{V}'_M \leq 2$ одним приближенным уравнением:

$$U_m = C_1 + C_2 + C_3, \quad (34)$$

$$C_1 = -0,787 (\mathbf{V}'_M)^6 + 5,126 (\mathbf{V}'_M)^5,$$

$$C_2 = -12,551 (\mathbf{V}'_M)^4 + 13,933 (\mathbf{V}'_M)^3,$$

$$C_3 = -6,217 (\mathbf{V}'_M)^2 + 1,065 (\mathbf{V}'_M) + 0,444,$$

а значения U_m для $\mathbf{V}'_M > 2$ определяются прежней формулой (33)

7. Максимум приземной концентрации вредного вещества C_{MU} [мг/м³] и скорости ветра U_B [м/с], отличающейся от опасной скорости ветра U_m [м/с] определяется по формуле:

$$C_{MU} = \Gamma C_m, \quad (35)$$

а безразмерный коэффициент Γ в зависимости

от отношения $\frac{U_B}{U_m}$ при $\frac{U_B}{U_m} \leq 1$

определяется по формулам:

$$\Gamma = 0,67 \left(\frac{U_B}{U_m}\right) + 1,67 \left(\frac{U_B}{U_m}\right)^2 - 1,34 \left(\frac{U_B}{U_m}\right)^3, \quad (36)$$

а при $\frac{U_B}{U_m} > 1$

$$r = \frac{3 \left(\frac{U_B}{U_m}\right)}{2 \left(\frac{U_B}{U_m}\right)^2 - \left(\frac{U_B}{U_m}\right) + 2}. \quad (37)$$

Две формулы (36, 37) заменяем с погрешностью до 5% одной приближенной формулой для

$(0,1 \leq \frac{U_B}{U_m} \leq 20)$:

$$r = 10^{\Phi_1},$$

где

$$\Phi_1 = T_1 + T_2 + T_3, \quad (38)$$

$$T_1 = -0,212 \left(\lg \frac{U_B}{U_m}\right)^6 - 0,04 \left(\lg \frac{U_B}{U_m}\right)^5,$$

$$T_2 = 0,89 \left(\lg \frac{U_B}{U_m}\right)^4 + 0,0023 \left(\lg \frac{U_B}{U_m}\right)^3,$$

$$T_3 = -1,6 \left(\lg \frac{U_B}{U_m}\right)^2 + 0,175 \left(\lg \frac{U_B}{U_m}\right) - 0,022.$$

8. Расстояние от источника выброса X_{MU} [м], на котором при скорости ветра U_B [м/с] приземная концентрация вредных веществ достигает максимума C_{MU} [мг/м³], определяется по формуле:

$$X_{MU} = P X_m, \quad (39)$$

где P – безразмерный коэффициент, определяемый в зависимости от отношения $\frac{U_B}{U_m}$ по формулам:

$$P = 3 \quad \text{при} \quad \frac{U_B}{U_m} \leq 0,25, \quad (40)$$

$$P = 8,43 \left(1 - \frac{U_B}{U_m}\right)^3 + 1 \quad \text{при} \quad 0,25 < \frac{U_B}{U_m} \leq 1, \quad (41)$$

$$P = 0,32 \frac{U_B}{U_m} + 0,68 \quad \text{при} \quad \frac{U_B}{U_m} > 1. \quad (42)$$

Формулы (40)–(42) заменяются для диапазона $0,1 \leq \frac{U_B}{U_m} \leq 20$ одним приближенным уравнением:

$$P = 10^{H_1}, \quad \text{где} \quad H_1 = I_{O_1} + I_{O_2} + I_{O_3}, \quad (43)$$

$$I_{O_1} = 0,436 \left(\lg \frac{U_B}{U_m}\right)^6 - 0,214 \left(\lg \frac{U_B}{U_m}\right)^5,$$

$$I_{O_2} = -1,31 \left(\lg \frac{U_B}{U_m}\right)^4 + 0,673 \left(\lg \frac{U_B}{U_m}\right)^3,$$

$$I_{O_3} = 1,331 \left(\lg \frac{U_B}{U_m}\right)^2 - 0,378 \left(\lg \frac{U_B}{U_m}\right) + 0,06.$$

9. При опасной скорости ветра U_m [м/с] приземная концентрация вредных веществ C [мг/м³] в атмосфере по оси факела выброса на различных расстояниях X [м] от источника выброса определяется по формуле:

$$C = S_1 C_m, \quad (44)$$

где S_1 – безразмерный коэффициент, определяемый в зависимости от отношения $\frac{X}{X_m}$,

при $\frac{X}{X_m} \leq 1$ по формуле:

$$S_1 = 3 \left(\frac{X}{X_m}\right)^4 - 8 \left(\frac{X}{X_m}\right)^3 + 6 \left(\frac{X}{X_m}\right)^2, \quad (45)$$

и при $1 < \frac{X}{X_m} \leq 8$

$$S_1 = \frac{1,13}{0,13 \left(\frac{X}{X_m}\right)^2 + 1}. \quad (46)$$

Формулы (45) и (46) заменяем для диапазона $0,1 \leq \frac{X}{X_m} \leq 8$ одним приближенным уравнением:

$$S_1 = 10^{D_1}, \quad \text{где} \quad D_1 = I_1 + I_2 + I_3 + I_4, \quad (47)$$

$$I_1 = -0,322 \left(\lg \frac{X}{X_m}\right)^6 - 0,265 \left(\lg \frac{X}{X_m}\right)^5,$$

$$I_2 = 0,754 \left(\lg \frac{X}{X_m}\right)^4 + 0,291 \left(\lg \frac{X}{X_m}\right)^3,$$

$$I_3 = -1,647 \left(\lg \frac{X}{X_m}\right)^2 + 0,042 \left(\lg \frac{X}{X_m}\right),$$

$$I_4 = 0,002.$$

Для других значений F и $\frac{X}{X_m}$ коэффициент S_1 по ОНД-86 определяется так:

$$S_1 = \frac{\frac{X}{X_m}}{3,58 \left(\frac{X}{X_m}\right)^2 - 35,2 \left(\frac{X}{X_m}\right) + 120} \quad (48)$$

при $1 < F \leq 1,5$ и $\frac{X}{X_m} > 8$;

$$S_1 = \frac{1}{0,1 \left(\frac{X}{X_m}\right)^2 + 2,47 \left(\frac{X}{X_m}\right) - 17,8} \quad (49)$$

при $F > 1,5$ и $\frac{X}{X_m} > 8$

Выполнено сравнение результатов расчетов по приведенным приближенным формулам и по формулам ОНД-86, для чего исходные данные взяты из примера ОНД-86: температура выбра-

сываемой смеси $T_c = 125^\circ C$; температура окружающего воздуха $T_B = 25^\circ C$; выброс двуокиси серы $M_{SO_2} = 12 \text{ г/с}$; коэффициенты: $A = 200$, $F = 1$, $\eta = 1$, высота трубы $H = 35 \text{ м}$; диаметр устья трубы $D = 1,4 \text{ м}$, скорость выхода выбрасываемой газовой смеси $\omega_0 = 7 \text{ м/с}$. Отличие результатов по максимальной концентрации C и расстоянию до нее X_m до 4%. Для практических расчетов получена вполне приемлемая погрешность.

Нижеприведенные примеры результатов исследования (рис. 1, 2.) выполнены из условия наддува чистого атмосферного воздуха на вход трубы с целью уменьшить концентрацию вредных веществ, движущихся в смеси вверх по трубе. Исходные данные для расчетов: высота трубы $H=100 \text{ м}$, ее диаметр $D = 2 \text{ м}$, температура выбрасываемой смеси меняется: интенсивность выбросов постоянна, температура атмосферного воздуха также постоянна, скорость ветра, коэффициенты: $A=200$, $F=1$, $\eta = 1$. Последовательно задаем расход, что соответствует наддуву воздуха 0, 10, 30, 50% от исходного расхода смеси при постоянстве указанной интенсивности выбросов M . Рис. 1, 2 иллюстрируют результаты расчетов для трех перепадов температур выбрасываемой смеси: 100, 150, 200°C.

Целью этих расчетов является проанализировать влияние разбавления выбросов воздухом, подаваемом на вход трубы, на максимальную приземную концентрацию и на расстояние выбросов при разных их температурах и при постоянстве температуры атмосферного воздуха.

При увеличении количества воздуха, поступающего на вход трубы при постоянстве интен-

сивности выбросов вредных веществ, происходит их разбавление в самой трубе и уменьшение концентрации, общий расход смеси возрастает. Вследствие увеличения расхода согласно формуле (2) происходит увеличение скорости выхода смеси из источника. В связи с ростом скорости происходит выбрасывание смеси на большую высоту, и, падая с большей высоты при наличии ветра, вредные вещества, разбавленные предварительно в трубе, рассеиваются на большие расстояния от трубы и площадь, максимум концентрации закономерно смещается дальше от трубы (рис. 1, 2).

Если температура выбросов возрастает, увеличивается перепад температуры между температурой выбросов и атмосферным воздухом, максимум концентрации при тех же условиях снижается за счет того, что горячие выбросы как более легкие поднимаются на большую высоту, а, падая с большей высоты, рассеиваются на большую площадь и дальше от трубы.

Предложенный метод расчета с погрешностью не более 4% по отношению к ОНД-86 позволяет уменьшить количество уравнений, примерно на 65%, упростить процедуру доводки программы, выполнять расчеты, касающиеся выбросов вредных веществ одиночным промышленным источником.

Приведенным примером расчета установлено, что максимум концентрации при разбавлении вредных примесей в трубе снижается, а его расстояние от трубы увеличивается не только благодаря самого факта предварительного разбавления, но и за счет увеличения скорости выброса смеси вследствие увеличения расхода, в ре-

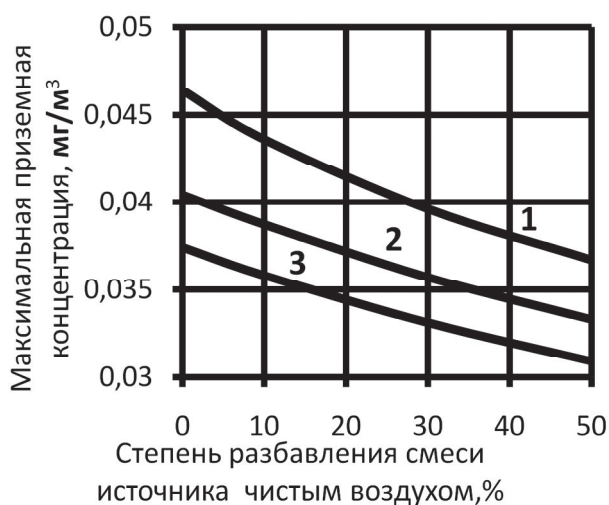


Рис. 1. Зависимость максимальной приземной концентрации от степени разбавления выбросов трубы чистым воздухом при различных перепадах температур между выбросами и атмосферой: 1 – $\Delta T = 100^\circ C$; 2 – $\Delta T = 150^\circ C$; 3 – $\Delta T = 200^\circ C$

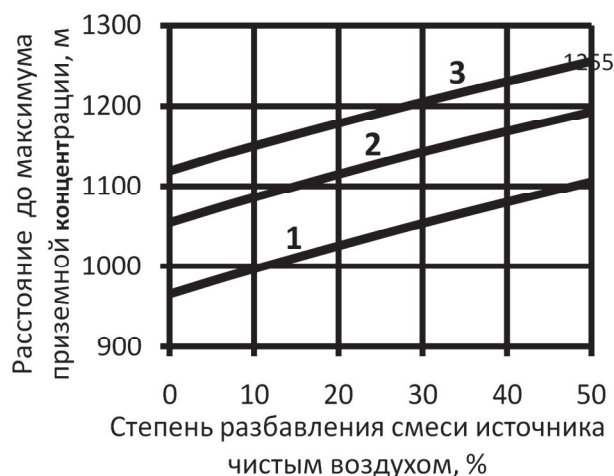


Рис. 2. Зависимость расстояния от трубы до точки максимума приземной концентрации от степени разбавления выбросов трубы чистым воздухом при различных перепадах температур между выбросами и атмосферой: 1 – $\Delta T = 100^\circ C$; 2 – $\Delta T = 150^\circ C$; 3 – $\Delta T = 200^\circ C$

зультате чего вредные вещества, падая с большей высоты, рассеиваются на большую площадь.

Увеличение перепада температур между температурой выбросов и температурой атмосферного воздуха также способствует снижению максимума концентрации и увеличению расстояния до нее за счет более легкой горячей смеси, поднимающейся на большую высоту и рассеивающейся дальше от трубы на большую площадь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ОНД-86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. Л.: Гидрометеоздат, 1987, 92 с.
2. *Ивлиев А.В., Морозов В.В., Сенина О.А., Шакиров Ф.М., Терентьев А.В.* Промышленная экология: метод. указ. для выполнения лабораторного практикума. Самара: СГАУ, 2007. 100 с.
3. *Терещенко А.В., Несолонов Г.Ф., Морозов В.В.* Оптимизация геометрических параметров одиночного источника выбросов: метод. указ. к лаб. раб. № 1. Самара: СГАУ, 2009. 12 с.
4. *Терещенко А.В., Несолонов Г.Ф., Морозов В.В.* Влияние температуры атмосферного воздуха на параметры загрязнения атмосферы вредными веществами, выбрасываемыми промышленным источником // Экология и промышленность России. 2011. №3. С. 23-25.
5. *Квашин И.М.* Предельно допустимые выбросы предприятия в атмосферу. Рассеивание и установление нормативов. М.: Техническая библиотека НП "АВОК", 2008. 425 с.
6. *Васильев П.П.* Практикум по безопасности жизнедеятельности человека, экологии и охране труда. М.: Финансы и статистика, 2004. 189 с.

CALCULATION OF DISPERSION OF HARMFUL EMISSIONS DUE TO THE OPERATION OF A SINGLE INDUSTRIAL SOURCE

© 2012 A.V. Tereshchenko

Samara State Aerospace University named after Acad. S.P. Korolev
(National Research University)

In this article the option of a design procedure of concentration of harmful substances in a ground layer is offered at emissions by a single source of the enterprise on basis OND-86. For simplification of algorithm of calculations and programming the majority of groups of the equations are replaced with a way of approximation by one equation. An error of the offered option of calculation less than 5 % that quite arranges practice of calculations.

Keywords: source height, the maximum concentration, speed of a wind, temperature drop, distance to a concentration maximum, approximation.