



УДК 502.175

Т.А. Стопорева,
А.Л. Новоселов

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ И НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЧВ ТОКСИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ, ВЫБРАСЫВАЕМЫХ С ОТРАБОТАВШИМИ ГАЗАМИ ДИЗЕЛЯ

Ключевые слова: атмосфера, критерий, градиент температуры, динамическая вязкость, дизель-генератор, турбулентность, токсичные вещества, концентрация, нагрузка.

Условия распространения в атмосфере и на поверхности почв токсичных веществ, выбрасываемых с отработавшими газами дизель-генератора, определяется состоянием окружающей среды, скоростью ветра, температурой, нагрузкой и концентрацией отдельных компонентов.

Состояние атмосферных условий в метеорологии связывается с турбулентностью атмосферы. Поскольку выпускные трубы дизель-генераторов, как правило, не имеют больших возвышений над поверхностью почвы, представляется возможным атмосферные условия связывать с турбулентным состоянием атмосферы в несколько упрощенном виде. То, что атмосферные условия влияют на распространение отработавших газов, было ранее показано А.Л. Новоселовым и установлено, что при $V_{ог} / \bar{u} < 3,56$ высоты факела выбросов становится меньше высоты выхлопной трубы уже на расстоянии 3-3,5 м, в то время как при $V_{ог} / \bar{u} > 3,56$ высота факела выбросов становится на 5 выше высоты среза выхлопной трубы дизель-генераторной установки (ДГУ) [1].

Исходя из теории массопереноса турбулентность атмосферы определяется динамическими и термическими критериями. Прежде чем перейти к описанию влияния турбулентности атмосферы на распро-

странение компонентов отработавших газов ДГУ, введем следующие обозначения: r – показатель метеоусловий, определяемый по величине вертикального переноса количества движения $0 < r < 1$; R_e – динамические критерии Рейнольдса; \bar{u} – средняя скорость ветра, м/с; L – характерный размер шлейфа газов, м; ν – кинематическая вязкость воздуха, м²/с; R_i – термический критерий Ричардсона; q – ускорение свободного падения, м/с²; dT/dz – градиент температуры по вертикали, К/м; T_0 – температура окружающей среды, К; du/dz – градиент скорости

по вертикали, м/с; $\overline{\tau_m}$ – величина силы трения, отнесенной к единице поверхности, Н/м; μ_g – вязкость газов, кг·с/м²; K_m – коэффициент турбулентной вязкости; \bar{c}_f – средняя концентрация f -го вещества в точке A с координатами x, y, z ; u, v, w – скорости вдоль осей координат x, y, z соответственно; $R(x)$ – эйлеровский коэффициент корреляции; $u'(\xi), \bar{u}'(\xi+t)$ – пульсация скоростей относительно оси x в момент с абсциссами $\xi, u(\xi + x)$; $u'(\Omega), \bar{u}'(\Omega + t)$ – пульсации скоростей частиц с абсциссой x в момент Ω и $(\Omega + t)$ времени; Q_f – выбросы f -го компонента из трубы двигателя, м³/ч; $Q_{ог}$ – выбросы отработавших газов дизелем, м³/ч; Su_z и Su_y – коэффициенты Сеттока, характеризующие вертикальную и горизонтальную турбулентные диффузии; v_f – скорость осаждения частиц (диаметром менее 1 мкм ($v_f = 0,03$ м/с).

Число Рейнольдса характеризует отношение сил инерции к силам вязкости (динамический критерий)

$$Re = \bar{u} \cdot L / \nu. \quad (1)$$

Термический критерий Ричардсона представляет собой число, определяющее меру стабильности турбулентности атмосферы и ее расслоения по мощности

$$Ri = \frac{g}{T_n} * \frac{dT}{dz} * r / \left(\frac{d\bar{u}}{dz} \right)^2. \quad (2)$$

Постольку трубы дизелей ДГУ имеют высоту над поверхностью почвы порядка 3-3,5 м, в уравнении (2) термического критерия Ричардсона градиент температуры по вертикали будет величиной незначительной, как и адиабатический градиент.

В случае ламинарных потоков количество движения переносится молекулами по касательной к потоку и пропорционально градиенту скорости

$$\bar{\tau}_T = \mu_s * \frac{d\bar{u}}{dz}, \quad (3)$$

а отношение динамической вязкости к плотности атмосферы представляется выражением

$$\bar{\tau}_T / \rho_0 = \nu * \frac{d\bar{u}}{dz}. \quad (4)$$

В условиях эксплуатации ДГУ приходится иметь дело только с турбулентными потоками атмосферы, где количество движения переносится крупнообъемными движущимися массами вблизи почвы [2, 3], а коэффициент турбулентной вязкости будет иметь вид

$$\vec{K}_M = \vec{K}_{Mx} + \vec{K}_{My} + \vec{K}_{Mz}. \quad (5)$$

Для помещений с ограниченным воздухообменом, где количество движения переносится направленными ламинарными потоками и пространство ограничено по высоте, коэффициент турбулентной вязкости имеет вид

$$\vec{K}_M = \vec{K}_{Mx} + \vec{K}_{My}, \quad (6)$$

тогда отношение динамической вязкости к плотности атмосферы принимает вид для условий эксплуатации на открытом пространстве

$$\frac{\bar{\tau}_T}{\rho_0} = (K_M + \nu) \frac{d\bar{u}}{dz} \approx K_M * \frac{d\bar{u}}{dz}, \quad (7)$$

и для условий эксплуатации в помещениях с ограниченным воздухообменом

$$\frac{\bar{\tau}_T}{\rho_0} \approx K_M. \quad (8)$$

Общее уравнение диффузии с учетом коэффициентов массопереноса имеет вид [2]

$$\frac{d\bar{c}}{dt} = \frac{d\bar{c}}{dt} + \bar{u} \frac{d\bar{c}}{dx} + \bar{v} \frac{d\bar{c}}{dy} + \bar{w} \frac{d\bar{c}}{dz} = \dots, \quad (9)$$

$$= \frac{d}{dx} \left(K_x \frac{d\bar{c}}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(K_y \frac{d\bar{c}}{dy} \right) + \frac{d}{dz} \left(K_z \frac{d\bar{c}}{dz} \right).$$

Уравнение (9) будет справедливо, если рассматривать загрязнение окружающей среды одним из компонентов отработавших газов дизеля ДГУ, закрепленного неподвижно, диффузия осуществляется в виде пульсаций, которые характеризуются величинами эйлеровской корреляции в пространстве

$$R(x) = u'(\xi) * u'(\xi + x) / (u'^2(\xi)),$$

$$R(y) = v'(\xi) * v'(\xi + y) / (v'^2(\xi)),$$

$$R(z) = w'(\xi) * w'(\xi + z) / (w'^2(\xi)), \quad (10)$$

и логранжевской корреляции во времени

$$R(t)_x = u'(\Omega) * u'(\Omega + t) / (u'^2(\Omega)),$$

$$R(t)_y = v'(\Omega) * v'(\Omega + t) / (v'^2(\Omega)),$$

$$R(t)_z = w'(\Omega) * w'(\Omega + t) / (w'^2(\Omega)). \quad (11)$$

С учетом описанных рассуждений Сеттоном для определения концентраций вредных выбросов в точке А пространства с координатами x, y, z выведены выражения

$$C_f(x, y, z) = \frac{2 K_M * Q_{oz}}{\pi * Su_y * Su_z * \bar{u} * x^{(2-r)}} \exp \left[-\frac{1}{x^{(2-r)}} \left(\frac{y^2}{Su_y^2} + \frac{(z+H)^2}{Su_z^2} \right) \right]. \quad (12)$$

Здесь направление ветра принимается по оси x, а Тейлором показано, что если $x = \bar{u} \cdot t$, то $R(x) = R(t)$ [2].

Коэффициенты вертикальной и горизонтальной диффузии имеют вид

$$Su_y^2 = \frac{4 \nu^r \left(\frac{v'^2}{\bar{u}^2} \right)^{1-r}}{(1-r)(2-r)\bar{u}^r}, \quad (13)$$

$$Su_z^2 = \frac{4 \nu^r \left(\frac{w'^2}{\bar{u}^2} \right)^{1-r}}{(1-r)(2-r)\bar{u}^r}. \quad (14)$$

С учетом метеоусловий для определения вертикальной и горизонтальной диффузии используют величины r:

сверхадиабатический градиент температур0,20;
сухоадиабатический градиент температур0,25;

слабая инверсия0,33;
 сильная инверсия0,50.

Отмечается, что у почвы, до высоты 10 м величина коэффициентов Сеттона можно в расчетах принимать:

$$Su_1 = 0,21; Su_2 = 0,10$$

В помещениях распространение вредных выбросов определяется только коэффициентом горизонтальной диффузии, и средняя скорость потока совпадает с направлением диффузии.

Расход влажных отработавших газов для дизелей без наддува определяется выражением

$$Q_{oz} = 4,148 * 10^{-3} \frac{G_T * T_0}{P_0} (\alpha + 0,0675), \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (15)$$

для дизелей с наддувом

$$Q_{oz} = 4,148 * 10^{-3} \frac{G_T * T_0}{P_k} (\alpha + 0,0675), \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (16)$$

где G_T – часовой расход топлива, кг/ч;

α – коэффициент избытка воздуха;

P_0 и P_k – давление окружающей среды и давление воздуха после компрессора, КПа.

Для решения задачи применяется принцип разделения струи отработавших газов на условные струи, компоненты в которых имеют свой молекулярный вес: воздуха – 29,3; оксида углерода – 28, оксидов азота – 46, углеводородов – 16. Сажа рассматривается как пылевые частицы. Рассеивание токсичных веществ определяется их содержанием и высотой выброса. Именно поэтому для каждого компонента необходимо отдельно производить расчет подъема факела выбросов над поверхностью почвы. Такой расчет выполняется по выражениям Бозанке, приведенным в литературе [2]. Расчеты производятся для определения приращений подъема факелов над средой трубы для каждого компонента

$$\Delta H_{cf} = \frac{4,77}{(1+0,43(\bar{u}/v_s))} - \frac{\sqrt{Q_f v_s}}{\bar{u}} + \frac{6,37 Q_f \Delta(\ln I^2 + \frac{2}{I} - 2)}{\bar{u}^3 * T_{oz}}, \quad (17)$$

$$I = \frac{\bar{u}^2 \left(0,43 \sqrt{\frac{T_1 f}{g * G}} - 0,28 \frac{v_s * T_1 f}{g * \Delta} \right)}{\sqrt{Q_f v_s} + 1}, \quad (18)$$

где Q_f – расход f -го компонента в $\text{м}^3/\text{ч}$ при температуре T_1 , К;

T_1 – температура, при которой удельный вес всех компонентов и воздуха равен;

v_s – скорость газа в устье трубы, м/с;

Δ – разность между температурами T_1 и T_0 ;

G – вертикальный градиент температуры.

Для расчета высоты выброса сажи, приняв её условно за взвесь, используется зависимость Холланда:

$$\Delta H = (1,5 * v_s * d + 5,172 * 10^{-3} * g_n) / \bar{u}, \quad (19)$$

где g_n – теплопроизводительность, кВт;

d – диаметр трубы, м.

В выражении (12) для определения концентрации веществ в точке А остается неопределенным коэффициент турбулентной вязкости. Этот коэффициент удастся рассчитать путем введения взамен коэффициента кинематической вязкости γ произведения коэффициента шероховатости z_0 на скорость трения для скорости ветра $\bar{u} = 5 \text{ м/с}$ на высоте 2 м. Тогда коэффициент турбулентной вязкости имеет вид

$$K_M = k * u_x * z \left(\frac{z}{z_0} \right)^{\beta-1} = k^2 * z^2 * \frac{d\bar{u}}{dz} \left(\frac{z}{z_0} \right)^{2\beta-2}, \quad (20)$$

где β – адиабатический градиент, $\beta = 1$;

k – постоянная Кармана, принимается $k = 0,4$ и учитывает длину смещения. Значения z_0 и \bar{u}_x заимствованы из литературы и приведены в таблице 1 [2].

Таблица 1

Значения коэффициентов шероховатости поверхности и скорости трения

Вид поверхности	z_0	\bar{u}_x
Лед, снежный покров, оголенная почва	$1 \cdot 10^{-5}$	0,16
Луга с травами до 0,01 м высотой	$1 \cdot 10^{-3}$	0,27
Луга с травами до 0,5 м высотой	$1 \cdot 2 \cdot 10^{-2}$	0,43
Высохшие травы до 0,6 м высотой	$4 \cdot 9 \cdot 10^{-2}$	0,60
Растительный покров свыше 1 метра	$14 \cdot 10^{-2}$	0,70
Целина зимой	$1 \cdot 2 \cdot 10^{-2}$	0,40
Целина летом	$2 \cdot 4 \cdot 10^{-2}$	0,50

Концентрация f-го компонента отработавших газов в точке с координатами x, y, z для четырехтактного дизеля

$$C_f(x, y, z) = \frac{K_M * C_f * Q_{Oz}}{\pi * Su_y * Su_z * \bar{u} * x^{(z-r)}} \exp \left[-\frac{1}{x^{(z-r)}} \left(\frac{y^2}{Su_y^2} + \frac{(z+H)^2}{Su_z^2} \right) \right] \quad (21)$$

Концентрация f-го компонента отработавших газов у поверхности почвы в точке максимальной концентрации

$$C_f^{max} = \frac{K_M * C_f * Q_{Oz}}{\pi * Su_y * Su_z * \bar{u} * x^{(z-r)}} \exp \left[-\frac{1}{x^{(z-r)}} \left(\frac{y^2}{Su_y^2} + \frac{H^2}{Su_z^2} \right) \right] \quad (22)$$

Для сажи (ТЧ) максимальная концентрация у почвы определяется выражением

$$C_c^{max} = \frac{10,9 * C_{cf} * Q_{Oz}}{Su_y * Su_z * \bar{u} * x^{(z-r)}} \exp \left[-\frac{1}{x^{(z-r)}} \left(\frac{y^2}{Su_y^2} + \frac{(H - \frac{x * y_f}{\bar{u}})^2}{Su_z^2} \right) \right], \text{ г/м}^3 \quad (23)$$

Задача определения загрязнения решается путем расчетов площадей эллипсов пятен, ограниченных концентрациями вредных веществ, превышающих ПДК от центра максимальных концентраций.

Теперь путем совмещения координат и положения эллипсов осаднения вредных веществ можно вводить и коэффициенты бинарности Ψ_f при оценке токсичности отработавших газов.

Распространение токсичных веществ в помещениях с ограниченным воздухообменом имеет свои особенности. Такими помещениями в сельскохозяйственном производстве являются теплицы, парники, животноводческие комплексы, склады, зернохранилища. Рекомендуется применять выражения, связывающие начальные концентрации, количество подаваемого воздуха для вентиляции, объем помещения, время работы двигателя в нем

$$C_f^n = (C_f^H - 1000 * \frac{G_{Ozf}}{M_B}) \exp(-\frac{M_B}{V_n} * \tau) + \frac{G_{Ozf}}{M_B}, \text{ г/м}^3, \quad (24)$$

где C_f^H – начальная концентрация f-го токсичного вещества;

M_B – количество подаваемого системой вентиляции воздуха, м³/ч;

G_{Ozf} – выбросы токсичного вещества, кг/ч;

V_n – объем помещения, м³.

С учетом выражений (15) и (16) концентрацию токсичного вещества с учетом времени эксплуатации дизеля в помещении можно описать:

$$C_f^n = \left(C_f^H - \frac{4,148 * 10^{-2} G_m * T_0 * (\alpha + 0,0675)}{M_B * P_0} \right) * \exp \left(-\frac{M_B}{V_n} * \tau \right) + \frac{4,148 * 10^{-2} (\alpha + 0,0675) G_m * T_0}{M_B * P_0 * C_f^{-1}}, \text{ г/м}^3, \quad (25)$$

$$C_f^n = \left(C_f^H - \frac{4,148 * 10^{-2} G_m * T_k * (\alpha + 0,0675)}{M_B * P_k} \right) * \exp \left(-\frac{M_B}{V_n} * \tau \right) + \frac{4,148 * 10^{-2} (\alpha + 0,0675) G_m * T_k}{M_B * P_k * C_f^{-1}}, \text{ г/м}^3. \quad (26)$$

Таким образом, при механизации процессов в сельскохозяйственном производстве с использованием мобильных машин и стационарных установок с дизелями появляется возможность оценки масштабов загрязнений, вносимых в окружающую среду с отработавшими газами.

Библиографический список

1. Новоселов А.Л. Последствия эксплуатации дизелей в животноводческих помещениях в зимних условиях / А.Л. Новоселов // Совершенствование технологий и средств механизации сельскохозяйственного производства: сб. науч. тр. – Новосибирск, 1986. – С. 128-180.

лов // Совершенствование технологий и средств механизации сельскохозяйственного производства: сб. науч. тр. – Новосибирск, 1986. – С. 128-180.

2. Детри Ж.-П. Атмосфера должна быть чистой / Ж.-П. Детри. – М.: Прогресс, 1973. – 380 с.

3. Кирпатовский И.П. Охрана природы: справочник для работников нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности / И.П. Кирпатовский. – М.: Химия, 1980. – 376 с.