

ПОДСИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА И ЗАЩИТЫ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ДВИГАТЕЛЯ

*И. П. Добролюбов, д.т.н., проф., О. Ф. Савченко, к.т.н., В. В. Дмитриев, инж.
ГНУ Сибирский физико-технический институт аграрных проблем Сибирского отделения
Россельхозакадемии (ГНУ СибФТИ СО РАСХН)*

Атмосферный воздух в рабочей зоне испытаний, диагностики, обслуживания и ремонта двигателей загрязнен токсичными составляющими отработавших газов. Контроль уровня загрязнения воздуха рабочей зоны осуществляется эпизодическим отбором проб и анализом их состава, что не отражает действительный процесс изменения состава атмосферы. Это не позволяет прогнозировать и фиксировать момент достижения предельно допустимых концентраций вредных веществ в воздухе. Система экологического автоматического мониторинга воздуха рабочей зоны учитывает динамику распространения вредных веществ в контролируемом пространстве. Быстродействие и выбор мест установки датчиков непрерывного контроля состава воздуха позволяют оптимизировать режим системы вентиляции и обеспечить экологическую безопасность в рабочей зоне.

Atmospheric air within the area of engine testing, diagnostics and maintenance is not infrequently polluted with toxic components of exhaust gases. Pollution level is normally monitored through periodical sampling and analyses, which does not ensure needed accuracy in tracing changes in atmosphere composition. This, in turn, prevents prediction and timely detection of moments when maximum permissible concentration limits are attained. Automatic environmental monitoring system is able to trace the dynamics of pollutants' spreading in the monitored space. Ecological safety and optimisation of vent system operation may be achieved through proper location of sensors and selection of their response characteristics.

За точность математических выкладок несет ответственность автор.

Одним из главнейших источников загрязнения воздушно-газовой среды рабочей зоны являются ДВС, испытания которых проводятся при диагностировании, техобслуживании и ремонте. В отработавших газах (ОГ) ДВС содержатся продукты неполного сгорания топлива (более 200 различных соединений), которые включают следующие компоненты: нетоксичные — O_2 , H_2 , H_2O , CO_2 ; токсичные — оксид углерода CO , оксиды азота NO_x , различные углеводороды простого и сложного соединения C_nH_m , сероводород H_2S (при сжигании сернистых дизельных топлив), оксиды серы SO_2 и SO_3 , альдегиды $RCHO$, формальдегид, сажу, соединения свинца; канцерогенные — бензапирен (полициклический ароматический углеводород $C_{20}H_{12}$), пирен, антрацен.

Контроль наличия вредных веществ в рабочей зоне при испытании ДВС в настоящее время основан преимущественно на эпизодическом отборе проб воздуха из загрязненных помещений и их анализе с помощью отдельных приборов. Поэтому он является трудоемким, неоперативным и малоэффективным. Системы очистки воздуха помещений работают, как правило, эпизодически или непрерывно, без учета концентрации вредных выбросов (КВВ) в воздухе рабочей зоны. С учетом опыта функционирования систем экологического мониторинга и защиты в различных отраслях промышленности необходима разработка и внедрение систем автоматизированного экологического мониторинга состояния рабочей зоны производственной среды и ее защиты (САЭМЗ) при испытании ДВС, которые адаптированы к условиям испытаний и обеспечивают точный и достоверный контроль вредных выбросов и защиту от них. Наиболее эффективно применение САЭМЗ в качестве подсистемы измерительной экспертной системы ДВС [1–3].

Однако существующие методики измерения КВВ в воздухе рабочей зоны базируются в основном на закономерностях накопления этих выбросов в стационарном режиме. Для более точного и достоверного экологического автоматического мониторинга рабочей зоны (выбора мест установки датчиков, быстродействия газоанализаторов и др.) необходимо также учитывать динамику распространения вредных выбросов (ВВ).

Для газодинамических процессов изменения КВВ в объеме V_p рабочей зоны обобщенное уравнение имеет вид:

$$(V_p/RT_p)dP/dt = Q\rho \text{ или } V_p dy/dt = G_r, \quad (1)$$

где R — газовая постоянная, T_p — абсолютная температура газа; P , ρ — давление и плотность газа; y — удельная масса ВВ; Q , G_r — результирующие объемный и массовый потоки газа (в единицу времени).

Объемный поток ОГ можно определить по формуле В. И. Смайлиса [4]:

$$Q = 10^{-6} \alpha_b l_0 G_T T_k \mu_{OG} / P_k, \text{ м}^3/\text{ч},$$

где α_b — коэффициент избытка воздуха; l_0 — теоретически необходимое количество воздуха (в килограммах) для сгорания 1 кг топлива; G_T — часовой расход топлива, кг/ч; T_k — абсолютная температура воздуха после компрессора, К (для безнаддувных дизелей $T_k = T_0 = 273\text{K}$); P_k — давление наддувочного воздуха, МПа (для безнаддувных дизелей $P_k = P_0$, где P_0 — атмосферное давление).

В ОГ, кроме того, содержится сажа с размерами твердых токсичных веществ (ТТВ) 0,7–8 мкм. Твердые частицы, адсорбировавшие ядовитые газы, также могут приобрести токсический характер. ТТВ имеют скорости распространения:

$$v_{pm} = d_m^2 \rho_m g / 18 \mu_{OG},$$

где d_m , ρ_m — диаметр и плотность ТТВ; g — ускорение свободного падения; μ_{OG} — вязкость ОГ.

Закон распределения ТТВ по фракциям имеет вид:

$$F(d) \frac{100}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\tau} \exp(-\tau^2/2) dt,$$

где $\tau = (\lg d - \lg d_{50}) / \lg \sigma_T$; d — диаметр ТТВ, мкм; d_{50} — медиана распределения диаметров частиц, мкм; σ_T — стандартное среднее квадратическое отклонение диаметров ТТВ.

Масса просачивающегося выброса i -го загрязняющего вещества в рабочую зону равна:

$$m_i = m_{уд,i} \Pi_p k_n (1 - \eta),$$

где $m_{уд,i}$ — удельное выделение i -го загрязняющего вещества; Π_p — расчетная производительность испытательного стенда; k_n — поправочный коэффициент, учитывающий особенности просачивания выбросов на данном стенде и ДВС; η — эффективность средств очистки выбросов (в долях единицы), при отсутствии этих средств $\eta = 0$.

При регулировке и обкатке ДВС на топливных и тормозных стендах, кроме того, происходит испарение топлива и смазочных материалов (содержащих ВВ), масса которых может быть определена по формуле Дальтона:

$$m_{исп} = 45,6 C S(u_n - u_b) / P_n,$$

где C — масса испаряющейся жидкости, кг/ч; S — площадь, охватываемая испаряющейся жидкостью; u_n , u_b — упругости паров испаряющейся жидкости при температуре испарения и в помещении соответственно, кПа; P_n — нормальное барометрическое давление воздуха, кПа.

Изменение КВВ в воздухе рабочей зоны можно представить как непрерывный случайный процесс. При этом справедливо предположить, что переход воздуха рабочей зоны из одного состояния в другое зависит не от всего прошлого, а только от предшествующего момента времени. В этом случае процесс можно считать марковским и для его полного описания достаточно знать одномерную плотность распределения вероятностей $W_1(y_i, t_i)$ и двумерную условную плотность распределения вероятности перехода $V_2(y_p, t_i | y_{i-1}, t_{i-1})$; $i = 2, n$, где значения процесса y_i, y_p, y_{i-1} соответствуют мгновенным значениям времени t_i, t_p, t_{i-1} .

Рассмотрим газодинамическую модель изменения КВВ как модель динамической стохастической системы, понимая под каждой реализацией путь, пройденный молекулой газа. Пусть имеем ансамбль реализаций процесса $y(t)$. При дельтообразных начальных условиях из точки y_0 выходит большое количество молекул. Их концентрация (плотность) в момент t в точке y пропорциональна распределению $W(y, t)$.

Величина $G_{кон} = K_1(y, t)W(y, t)$ — систематический конвекционный поток молекул газа вдоль оси y . Помимо конвекционного движения в газе происходит процесс диффузии. Поток диффузии при $K_2(y, t) = K_2 = \text{const}$ пропорционален градиенту КВВ и направлен от большей плотности (концентрации) к меньшей, поэтому диффузионный поток равен:

$$G_{диф} = -\frac{K_2}{2} \frac{\partial W(y, t)}{\partial y}.$$

Полный поток $G(y, t)$ по оси y равен:

$$G(y, t) = K_1(y, t)W(y, t) - \frac{1}{2} \frac{\partial [K_2(y, t)W(y, t)]}{\partial y}.$$

Тогда уравнение для изменения КВВ запишется в виде

$$\frac{\partial W(y, t)}{\partial t} + \frac{\partial G(y, t)}{\partial y} = 0.$$

Ввиду того, что время корреляции τ_k процесса изменения КВВ в рабочей зоне много меньше постоянной времени газоанализатора, реальный случайный процесс $y(t)$, описывающий изменение КВВ в рабочей зоне, можно заменить «эквивалентным» белым шумом $n(t)$, спектральная плотность которого

$$S_{\xi}(y) = \frac{N_0}{2} = S_{\xi}(y=0) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{\xi}(\tau) d\tau = 2\sigma_{\xi}^2 \tau_{\xi}$$

где $N_0 = \text{const}$; σ_{ξ}^2 — дисперсия, а $R(\tau)$ — корреляционная функция процесса $\eta(t)$.

Тогда для винеровского процесса $d\xi/dt = n(t)$, с учетом нормальности белого шума и того, что математическое ожидание $M\{n(t)\} = 0$; $R(\tau) = -(N_0/2)\delta(\tau)$, при нулевых начальных условиях имеем плотность распределения вида [5]:

$$W(\xi, t) = (1/\sqrt{\pi N_0 t}) \exp\{-\xi^2 / N_0 t\}. \quad (2)$$

Из уравнения (2) видно, что распределение процесса является нормальным с дисперсией, растущей пропорционально времени t .

Найдем момент достижения процессом изменения КВВ заданной границы, определяющей переход в следующий класс состояния воздушной среды рабочей зоны — достижение предельно допустимой концентрации (ПДК). Так как при переходе в этот класс состояния рабочая зона меняет свою структуру, то можно указанные границы считать поглощающими, т. е. процесс обрывается в момент достижения границы. Обозначим через b и a верхнюю и нижнюю границы и полагаем, что начальное значение $y = y_0$ при $t = t_0$ находится внутри интервала $[a, b]$. Среднее время T_z первого достижения процессом границ (считая K_1 и K_2 не зависящими от времени, т. е. рассматривая процесс на отдельных квазистационарных участках) можно определить из уравнения [5]

$$-1 = K_1(y_0) \frac{dT_z}{dy_0} + \frac{1}{2} K_2(y_0) \frac{d^2 T_z}{dy_0^2}. \quad (3)$$

При решении уравнения (3) учитываем граничные условия: если $y_0 = 0$ или $y_0 = b$, то $T_z = 0$.

В силу инерционности изменения состава воздушной среды рабочей зоны обобщенное стохастическое уравнение (1) для y можно представить в виде

$$y + ay = an(t), \quad (4)$$

где $a = 1/T_{\text{ин}}$, $T_{\text{ин}}$ — газодинамическая постоянная времени рабочей зоны.

Для уравнения (4) имеем $K_1(y, t) = K_1(y) = -ay$; $K_2(y, t) = K_2 = a^2 N_0 / 2$.

При пороге $b = z_0$ и начальном условии $y_0 = 0$ решение (3) имеет вид:

$$T_z = \frac{1}{a} \sqrt{\pi/2} \int_0^{z_0/\sigma_y} [2\Phi(\xi) - 1] e^{-\xi^2/2} d\xi$$

где $2\Phi(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\xi} \exp(-t^2/2) dt$ — интеграл вероятности;

$\sigma_y^2 = N_0 a / 4$ — дисперсия процесса y в стационарном режиме.

Если установлен порог $b = \sigma_y$, то $T_z \approx 1,25 T_{\text{ин}}$, а если $b = 2\sigma_y$, то $T_z \approx 5,73 T_{\text{ин}}$.

Например, при обкатке дизеля А-41 ($G_T = 19$ кг/ч, $a_n = 1,3$, $T = 300$ К, $P_0 = 0,101$ МПа), полагая, что объем рабочей зоны $V_p = 1$ м³ и что в нее просачивается КВВ, составляющая 1% от общего потока ОГ, получим $T_{\text{п3}} = V_p/Q = 1,12$ с и время достижения первого порога ПДК = 50 мг/м³ составит $T_z = 1,4$ с, а второго порога ПДК — $T_z = 6,4$ с.

Эффективность САЭМЗ во многом определяется принципом действия и характеристиками измерительных каналов КВВ среды. Любой измерительный канал (ИК) САЭМЗ можно рассматривать как последовательность измерительных преобразований некоторого физико-химического свойства вещества $\Phi(t)$, изменяющегося во времени. Каждый ИК контроллера САЭМЗ содержит, как правило, первичный измерительный преобразователь (ПИП) — датчик, согласующий усилитель, преобразовательный (функциональный) элемент (при необходимости). Выходной сигнал ИК $U(t)$ — измерительная информация, отражающая преобразование $\Phi(t)$. Сигналы $U_i(t)$, $i = 1+k$ (k — число ИК в САЭМЗ) через мультиплексор поочередно (или выборочно с приоритетом) поступают на микропроцессорный измерительный блок, в котором происходит измерение уровня $\Phi_i(t)$, и в случае $\Phi_i(t) > \Phi_{i,\text{доп}}(t)$ ($\Phi_{i,\text{доп}}(t)$ — допустимый уровень $\Phi_i(t)$) подается сигнал на блок сигнализации или в систему автоматического управления, устраняющую отклонение $\Delta\Phi = \Phi_i(t) - \Phi_{i,\text{доп}}(t)$.

К ИК САЭМЗ предъявляются следующие основные требования: высокие чувствительность, разрешающая способность и точность, малая инерционность, линейность статической характеристики (СХ), постоянство коэффициента преобразования в рабочем диапазоне, высокие помехозащищенность и надежность, простота и безопасность в работе.

На линейном участке СХ $U = k_{\text{и}} \Phi$, где $k_{\text{и}}$ — коэффициент преобразования ИК (чувствительность).

Физико-химическое свойство ОГ является аддитивной функцией объемных концентраций определяемого ВВ C_0 и неопределяемого $C_{\text{н}} = 1 - C_0$ компонентов: $\Phi = \Phi_0 C_0 + \Phi_{\text{н}} (1 - C_0)$, где Φ_0 и $\Phi_{\text{н}}$ — одинаковые с Φ физико-химические свойства C_0 и $C_{\text{н}}$. Тогда на выходе ИК в непрерывном режиме: $U = ax_0 + U_0$, где $x_0 = C_0 \cdot 100$ — объемная концентрация компонента C_0 , %; $a = k_{\text{и}} (\Phi_0 - \Phi_{\text{н}}) / 100$ — коэффициент преобразования ИК по концентрации.

Инерционность ИК описывается в динамическом (переходном) режиме дифференциальными уравнениями вида (при измерении физико-химических свойств и концентрации соответственно)

$$T_{\text{ИК}} dU(t)/dt + U(t) = k_{\text{н}} \Phi(t - \tau_{\text{ИК}}),$$

$$T_{\text{ИК}} dU(t)/dt + U(t) = ax_0(t - \tau_{\text{ИК}}),$$

где $T_{\text{ИК}}$ — постоянная времени ИК; $\tau_{\text{ИК}}$ — время «чистого» запаздывания в ИК, равное сумме времени запаздывания в ПИП и в остальной части ИК; $x_0 = C_0 \cdot 100$ — объемная КВВ, %.

Задавая допустимые уровни $\Phi_{\text{доп}}$ или $x_{0\text{доп}}$, а также требуемую инерционность в обнаружении этих уровней, можно выбрать ПИП и предъявить требования к ИК контроллера САЭМ. Например, кондуктометрические ПИП могут использоваться для анализа в помещении газов CO , CH_4 , SO_2 , H_2S , HCl , NH_3 . При этом порог чувствительности таких ПИП (минимальный измеряемый уровень Π или x_0 достаточно низкий: например, к газу SO_2 составляет по объему $2 \cdot 10^{-6}$ %, к HCl — $2 \cdot 10^{-10}$ г/с и т. д., а порог чувствительности ионизационных газоразрядных ПИП к галогеносодержащим соединениям составляет 10^3 – 10^4 мВ/%.

Таким образом, зная параметры конкретного источника вредных веществ, можно определить среднее время перехода рабочей зоны производственного помещения в следующий класс состояния по уровню КВВ, и задать требования к системе автоматического экологического мониторинга рабочей зоны (оперативности измерения КВВ, месту установки датчиков, их типа и параметров и др.), а также обосновать параметры системы защиты (приточно-вытяжной вентиляции и др.).

Внедрение системы автоматизированного мониторинга состояния производственной среды и защиты рабочей зоны при испытании, ремонте и обкатке ДВС позволит обеспечить экологическую безопасность этих операций, улучшить санитарно-гигиенические условия труда персонала, оптимизировать режим работы систем защиты воздушной среды и, следовательно, повысить производительность труда и качество проводимых работ, а также снизить энергозатраты.

Литература

1. Добролюбов И. П., Савченко О. Ф., Альт В. В. Измерительный технологический комплекс экспертизы технического состояния ДВС // Двигателестроение. — 1998. — № 2. — С. 27–30.

2. Альт В. В., Добролюбов И. П., Савченко О. Ф. Информационное обеспечение экспертизы состояния двигателей. — Новосибирск: РАСХН, Сиб. отд-ние СибФТИ, 2001. — 220 с.

3. Добролюбов И. П., Савченко О. Ф., Альт В. В. Идентификация состояния сельскохозяйственных объектов измерительными экспертными системами. — Новосибирск: РАСХН, Сиб. отд-ние СибФТИ. — 2003. — 209 с.

4. Смайлис В. И. Малотоксичные двигатели. — Л.: Машиностроение, 1972. — 128 с.

5. Казаков В. М. Введение в теорию марковских процессов и некоторые радиотехнические задачи. — М.: Советское радио, 1977.

ЗАКРЖЕВСКИЙ ВЛАДИМИР ПЕТРОВИЧ

12.02.1951–20.06.2005

Безвременно ушел из жизни начальник Управления международных продаж ОАО «ЗВЕЗДА», к.т.н. Закржевский В. П.

Вся трудовая деятельность Владимира Петровича была связана с заводом «ЗВЕЗДА», куда он поступил в 1974 г. после окончания Ленинградского механического института и прошел большой трудовой путь от рядового инженера, начальника экспериментально-исследовательской лаборатории до главного конструктора ОКБ. В последнее время Закржевский В. П. занимался внешнеэкономической деятельностью и, обладая высокими деловыми качествами, технической эрудицией и прекрасным знанием английского языка, внес большой вклад в продвижение продукции завода на международные рынки Китая, стран Юго-Восточной Азии и Ближнего Востока.

В 1979–1982 гг. Закржевский В. П. прошел обучение в аспирантуре ЦНИДИ и защитил кандидатскую диссертацию.

В 1991–1997 гг., будучи главным конструктором ОКБ завода, Владимир Петрович в эти тяжелейшие годы перестройки возглавил опытно-конструкторские работы по созданию, освоению производства и внедрению дизелей 124Н 18/20 3-го конструктивного поколения (M470), а также модификаций дизелей 564Н 16/17 (M520Б, M532, M533) в новые проекты судов. Он заложил научно-техническую базу для разработки реверс-редукторных передач и организации на заводе редукторного производства судового назначения.

Талантливый инженер и ученый, Закржевский В. П. являлся автором многих научных трудов и изобретений, имел правительственные награды.

Память о замечательном человеке, истинном интеллигенте и профессионале надолго останется в истории отечественного дизелестроения.



Коллектив ОАО «Звезда»