УДК 669.85/86+502.7

МЕТОДОЛОГИЯ ПЛАНИРОВАНИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКОИССЛЕДОВАНИЙ АВТОМОБИЛЕЙ

П. М. Канило, проф., д. т. н.,
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Аннотация. *Автотранспорт является определяющим техногенным источником загрязнения атмосферы городов канцерогенно-мутагенными супертоксикантами. Изложена методология планирования, проведения, математизации и компьютеризации результатов экспериментальных исследований канцерогенно-мутагенной опасности автомобилей с ДВС.*

Ключевые слова: *окружающая среда, автотранспорт, двигатели внутреннего сгорания, экоисследования, отработавшие газы, оксиды азота, твердые частицы, бенз(а)пирен, интервалы неопределенностей, коэффициент надежности.*

МЕТОДОЛОГІЯ ПЛАНУВАННЯ ТА МАТЕМАТИЧНОГО ОПРАЦЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКОДОСЛІДЖЕНЬ АВТОМОБІЛІВ

П. М. Каніло, проф., д. т. н.,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. *Автотранспорт є визначальним техногенним джерелом забруднення атмосфери міст канцерогенно-мутагенними супертоксикантами. Викладено методологію планування, проведення, математизації та комп'ютеризації результатів експериментальних досліджень канцерогенно-мутагенної небезпеки автомобілів із ДВЗ.*

Ключові слова: *навколишнє середовище, автотранспорт, двигуни внутрішнього згоряння, екодослідження, відпрацьовані гази, оксиди азоту, тверді частинки, бенз(а)пірен, інтервали невизначеностей, коефіцієнт надійності.*

PLANNING METHODOLOGY AND MATHEMATICAL PROCESSING OF THE RESULTS OF ECOLOGICAL RESEARCH OF VEHICLES

P. Kanilo, Prof., D. Sc. (Eng.),
Kharkiv National Automobile and Highway University

Abstract. *Motor transport is a determining man-made source of urban pollution by carcinogenic, mutagenic supertoxicants. The methodology of planning, conducting, mathematization and computerization of experimental studies results of carcinogenic and mutagenic hazard caused by vehicles with internal combustion engines is stated.*

Key words: *environment, motor transport. internal combustion engine, ecological research, exhaust gases, oxides of nitrogen, solid particles, benzo(a)pyrene, uncertainty intervals, reliability factor.*

Введение

В настоящее время ресурсо(энерго)сбережение, экология окружающей среды (ОС) и человеческого общества являются важнейшими составляющими в решении топливно-экологического кризиса XXI века и базовыми доминантами в развитии новых наукоемких технологий. Проблема канцерогенного загрязнения ОС, в первую очередь атмосферы крупных городов, является одной из наиболее острых и наименее решаемых среди всех экологических проблем. При этом автотранспорт с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) является определяющим техногенным источником загрязнения атмосферы городов канцерогенно-мутагенными ингредиентами (КМИ). Основными составляющими КМИ в отработавших газах (ОГ) автомобильных ДВС являются: оксиды азота (NO, NO_2), канцерогенные углеводороды (КУ), индикатором которых является бенз(а)пирен (БП – $C_{20}H_{12}$), и твердые частицы (ТЧ). В настоящее время в городах с развитым автомобильным транспортом среднесуточные концентрации БП (КУ) в атмосфере городов уже превышают допустимый уровень на 1–2 порядка [1–6]. Такой уровень роста загрязнения среды КМИ приведет к тому, что затраты на оздоровление природы и излечение «больного человечества» могут стать самой крупной статьей экономики мира. Поэтому исследователь в любой отрасли знаний, в том числе – в области минимизации канцерогенно-мутагенной опасности автомобильного транспорта, должен в совершенстве владеть методами планирования и организации эксперимента, математической и компьютерной обработки, анализа и интерпретации полученных результатов.

Анализ публикаций

В настоящее время широко применяют математическую теорию планирования эксперимента, которая позволяет исследовать и оптимизировать сложные системы и процессы, в том числе процессы в камерах сгорания ДВС, обеспечивая высокую эффективность эксперимента и точность определения исследуемых факторов. Планирование позволяет построить оптимальную стратегию исследования, обеспечивающую наибольшую эффективность при минимуме затрат времени и средств.

Методология современного эксперимента включает следующие этапы: глубокое понимание процессов, происходящих в исследуемом объекте, планирование эксперимента, использование современных методик и диагностических комплексов, обеспечивающих необходимую точность измерений, статистическую обработку и корреляционный анализ полученных результатов [1, 7, 8].

Цель и постановка задачи

Цель статьи – изложить современную методологию подготовки и проведения, а также математической и компьютерной обработки результатов проведенных экоисследований ДВС и автомобилей, в том числе при их испытании по Европейским ездовым циклам. На конкретных примерах экологических испытаний объектов обосновать методику статистической обработки результатов исследований, в том числе с учетом определения границ интервалов неопределенностей при заданном коэффициенте надежности.

Методика обработки результатов с приближенными числами

При проведении экспериментальных исследований инженер-эколог сталкивается (в основном) с приближенными численными значениями измеряемых параметров. В связи с этим при планировании экспериментальных исследований должен указываться систематический интервал неопределенностей ($\Delta X_{\text{сист.}}$), а также задаваться суммарный (максимально допустимый) интервал неопределенностей (ΔX) для диагностируемого параметра. Определение термодинамических параметров (p, Δp, T, Q, G, C, φ) и других ингредиентов газовых потоков связано с большим числом измерений. Поэтому обработку результатов измерений и связанные с этим расчеты следует проводить в соответствии с правилами математической статистики. Каждый результат отдельного прямого и косвенного измерения величины представляет собой приближенное число, точность которого определяется интервалом неопределенности (суммарной погрешностью) и коэффициентом надежности измерения. Приближенное число принято записывать так, чтобы погрешность последней цифры не превышала 10 единиц соответствующего разряда. В этом случае все цифры числа, характеризующие результат измерения, кроме «последней», верные, «последняя» цифра – сомнительная, а все находящиеся за сомнительной – неверные. Например, x = 1,42 7 086, при Δx = ± 0, 002, где: 1,42 – верные значения, 7 – сомнительная цифра, 086 – неверные цифры. При окончательной записи результатов измерений все неверные цифры отбрасывают, соблюдая правило округления. Если же полученное приближенное число входит в расчетную формулу, в нем оставляют одну неверную цифру как запасную. Поэтому предыдущий результат будет записан как x = 1,42 7 1, при Δx = ± 0, 002. Например, экспериментально определено, что концентрация NO в ОГ ДВС при его стендовых испытаниях составила: C_{NO} = 5,7328 при ΔC_{NO} = 0,01 мг/м^3, а объемный расход ОГ соответствовал: $Q_{ОГ}$ = 100,615 при $\Delta Q_{ОГ}$ = 0,1 м^3/час. Необходимо представить показания C_{NO} и $Q_{ОГ}$ как промежуточные и окончательные. Итак, C_{NO} = 5,733 и C_{NO} = 5,73 мг/м^3; а $Q_{ОГ}$ = 100,62; и $Q_{ОГ}$ = 100,6 м^3/час. Поэтому при определении уровней выбросов NO с ОГ ДВС, т. е. $G_{NO} = Q_{ОГ} \cdot C_{NO}$, будут использоваться промежуточные результаты, а суммарный интервал неопределенности (абсолютной погрешности) ΔG_{NO} будет определяться по схеме для произведения двух случайных чисел.

Погрешности измерений при экспериментальных экоисследованиях

Если измеренное значение величины равно x, а истинное (нам неизвестное) есть $x_{ист.}$, то под абсолютной погрешностью этих величин понимают разность $|x - x_{ист.}|$. Так как истинное значение $x_{ист.}$ нам неизвестно, то и погрешность, строго говоря, определить не представляется возможным. Поэтому вводится понятие абсолютной погрешности (предела неопределенности) Δx, определяемой неравенством $x - \Delta x \le x_{ист.} \le x + \Delta x$. Задача исследователя состоит в том, чтобы установить наименьшее, но удовлетворяющее вышеприведенному условию значение Δx, так как чрезмерно большие значения Δx обесценивают результат эксперимента. Кроме абсолютной погрешности $|x - x_{ист.}|$, пользуются понятием относительной погрешности, которая равна абсолютной погрешности, отнесенной к измеряемой величине, и выражается в долях $|(x - x_{ист.})/x|$ или в процентах $|(x - x_{ист.})/x| \cdot 100$, %. Относительная погрешность приближенного числа связана с количеством его верных знаков, которые отсчитываются от первой значащей цифры числа до первой значащей цифры его абсолютной ошибки. Например, если для числа x = 5,8247 абсолютная погрешность Δx = 0,0034, то число x имеет три верных знака (5, 8, 2), остальные знаки – сомнительные.

Погрешности измеряемых величин, в зависимости от причин их порождающих, разделяют на систематические, случайные и грубые.

Систематическая погрешность – это постоянная погрешность, определяемая погрешностью приборов и погрешностью методики измерения. Например, при измерении температуры газа около 500 °С платиновой термопарой можно гарантировать точность измерения температуры 5 °С. При этом экспериментатор, естественно, не будет знать действительного значения измеряемой температуры. Ему будет лишь известно, что отклонение измеренного значения температуры от истинного не превосходит 5 °С. Систематическая погрешность прибора определяется по формулам, которые приведены в паспорте прибора. В том случае, когда такие формулы отсутствуют, пользуются классом точности прибора. Класс точности прибора – это число, характеризующее относительную погрешность прибора. Например, если на циферблате прибора имеется обозначение 1.0, то это означает, что приборная относительная погрешность (δ) составляет 1 % от максимально оцифрованной шкалы прибора. Абсолютная систематическая погрешность такого прибора принимается постоянной и равной $\Delta x_{сист.} = (\delta \cdot X_{макс.}) / 100$. Относительную погрешность величины x, измеряемой прибором, определяют по следующей зависимости: $\varepsilon \cdot x = 100 \cdot \Delta x_{сист.} / \overline{x} = \delta \cdot X_{макс.} / \overline{x}$, %, из которой видно, что погрешность измерения меньше, если показания прибора находятся в конце оцифрованной шкалы. Поэтому необходимо подбирать приборы так, чтобы измеряемый параметр находился около максимального значения шкалы.

Случайная погрешность вызывается случайными факторами, которые, действуя поразному, могут привести к тому, что измеряемая величина может отличаться от истинной, как по абсолютной величине, так и по знаку отклонения. Случайные погрешности вызываются большим числом случайных причин, действие которых на каждое измерение различно и не может быть заранее учтено. Типичным примером подобных погрешностей может служить так называемая ошибка параллакса, силы трения в частях прибора и т. д., т. е. мы обычно получаем либо завышенные, либо заниженные результаты. Явление параллакса, например, имеет место при определении уровня жидкости (ртути) в термометре относительно шкалы. Таким образом, случайная погрешность проявляется в разбросе экспериментальных данных.

Влияние случайных погрешностей на окончательный результат измерения можно значительно снизить, многократно повторяя измерения и выбирая в качестве окончательного среднее значение из многих полученных. Следует стремиться к более строгому поддержанию режима при измерении и тщательному выполнению отсчетов по приборам с тем, чтобы уменьшить влияние случайных факторов на измеряемую величину. Хотя исключить случайные погрешности отдельных измерений невозможно, математическая теория случайных явлений позволяет уменьшить влияние этих погрешностей на окончательный результат измерений и установить разумное значение погрешностей. Следует иметь в виду, что если случайная погрешность, полученная из данных измерений, окажется значительно меньше погрешности, определяемой точностью прибора, то очевидно, что нет смысла пытаться еще уменьшить величину случайной погрешности – все равно результаты измерений не станут от этого точнее.

Грубая погрешность – это погрешность, существенно превышающая ожидаемую при данных условиях. Грубая погрешность обычно связана или с неисправностью приборов, или с невнимательностью экспериментатора. Например, записывая показания прибора, можно записать одну цифру вместо другой. При единичном измерении грубую погрешность найти трудно. При многократных измерениях величина, имеющая грубую погрешность (промах), должна быть исключена из обработки результатов экспериментов.

Примеры математической обработки результатов экоисследований автомобилей

Пример 1. При многократном испытании легкового автомобиля типа ГАЗ–3110 на стенде с беговыми барабанами по Европейскому городскому ездовому циклу получены следующие данные по уровням выбросов NO с ОГ за испытание (табл. 1). Систематическая погрешность измерения уровней выброса NO составляла $\Delta g_{\text{сист.}} = 0{,}5$ г/исп.

Таблица 1 Экспериментальные данные

№ п/п	g_{NO}, г/исп.	Δg_i	$(\Delta g_i)^2$
1.	8,5	0.5	0,25
2.	8,6	0,4	0,16
3.	8,8	0,2	0,04
4.	9,0	0	0
5.	9,2	-0,2	0,04
6.	9,4	-0,4	0,16
7.	9,6	-0,6	0,36
	$\overline{g} = 9$		$\sum(\Delta g_i)^2 = 1{,}01$

Определяем среднеарифметическое (математическое ожидание) показателя g_{NO}

$$\overline{g}_{\text{NO}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{7} g_i = 9. \qquad (1)$$

Определяем отклонения конкретного измерения от вычисленного среднего значения и заносим их в табл. 1

$$\Delta g_i = \overline{g} - g_i. \qquad (2)$$

Вычисляем квадраты отклонений, заносим их в табл. 1 и находим сумму этих квадратов.

Определяем среднеквадратичное отклонение среднего значения измеряемой величины от истинного значения

$$S_{\overline{g}} = \sqrt{\frac{\sum(\Delta g_i)^2}{n \cdot (n-1)}} \cong 0{,}16. \qquad (3)$$

Так как показатель $S_{\overline{g}}$ сам является случайной величиной, то дополнительно вводится статистический коэффициент Стьюдента (табл. 2) $t_\alpha = t(n,\ \alpha)$, и тогда случайная погрешность определяется следующим образом: $\Delta g_{\text{случ.}} = t_\alpha \cdot S_{\overline{g}} = 2{,}45 \cdot 0{,}16 \cong 0{,}4$.

Таблица 2 Статистические коэффициенты

n	α		
	0,90	0,95	0,99
2	6,31	12,71	63,7
3	2,92	4,30	9,92
4	2,35	3,18	5,84
5	2,13	2,78	4,60
6	2,02	2,57	4,03
7	1,94	2,45	3,71
8	1,90	2,36	3,50
9	1,86	2,31	3,36
10	1,83	2,26	3,25
20	1,72	2,09	2,84
50	1,68	2,01	2,68
100	1,66	1,98	2,63
500	1,65	1,96	2,58

Примечание. Коэффициент t_α определяется из табл. 2, где n – количество измерений, α – принятый коэффициент надежности. При экологических исследованиях $\alpha = 0{,}95$.

Теперь определяем значение суммарной погрешности (интервала неопределенности) измерения уровней выброса NO с ОГ исследуемого автомобиля

$$\Delta g_{\text{NO}} = \sqrt{(\Delta g_{\text{случ}})^2 + \left(\frac{k_\alpha}{3}\right)^2 \cdot (\Delta g_{\text{сист}})^2} = \\ = \sqrt{(0{,}4)^2 + 0{,}43 \cdot (0{,}5)^2} \cong 0{,}5 \text{ г/исп.} \quad (4)$$

Примечание. Коэффициент $k_\alpha = t_\alpha$ при $n = 500$ (табл. 2).

Окончательно записываем значения показателя g_{NO} при $\alpha = 0{,}95$ с доверительным интервалом и принятым коэффициентом надежности $g_{\text{NO}} = \bar{g}_{\text{NO}} + \Delta g_{\text{NO}} = 9 + 0{,}5$, г/исп.

Примечание. Для экологических данных Δg_i имеет всегда положительный знак.

Относительная погрешность измерения уровней выброса NO с ОГ исследуемого автомобиля соответственно составляет

$$\varepsilon g = \frac{\Delta g}{\bar{g}} \cdot 100 = \frac{0{,}5}{9} \cdot 100 \cong 5{,}6\ \%. \quad (5)$$

Пример 2. Проведено пять измерений удельных выбросов ТЧ с ОГ автомобиля при его испытании по Европейскому городскому ездовому циклу, результаты которых занесены в табл. 3. При этом $\Delta g_{\text{ТЧ(сист.)}} = 0{,}05$ г/км.

Таблица 3 Экспериментальные данные

$g_{\text{ТЧ}}$, г/км	Δg_i	$(\Delta g_i)^2$
0,50	+0,08	0,0064
0,54	+0,04	0,0016
0,56	+0,02	0,0004
0,60	–0,02	0,0004
0,70	–0,12	0,0144
$\bar{g}_{\text{ТЧ}} = 0{,}58$		$\sum(\Delta g_i)^2 = 0{,}023$

Находим среднеарифметическое значение удельных выбросов ТЧ с ОГ автомобиля

$$\bar{g}_{\text{ТЧ}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{5} g_i = 0{,}58 \text{ г/км} \quad (6)$$

Определяем отклонения измерений от среднего значения и заносим их в табл. 3

$$\Delta g_i = \bar{g} - g_i. \quad (7)$$

Вычисляем квадраты этих отклонений и находим их сумму (табл. 3).

Определяем среднеквадратичное отклонение среднего значения от истинного значения

$$S_{\bar{g}} = \sqrt{\frac{\sum(\Delta g_i)^2}{n \cdot (n-1)}} = \sqrt{\frac{0{,}023}{20}} \cong 0{,}034. \quad (8)$$

Так как показатель $S_{\bar{g}}$ сам является случайной величиной, то дополнительно вводится статистический коэффициент Стьюдента $t_\alpha = t(n, \alpha)$, и тогда случайная погрешность определяется следующим образом: $\Delta g_{\text{случ.}} = t_\alpha \cdot S_{\bar{g}} = 2{,}78 \times$ $\times\ 0{,}034 \cong 0{,}09$.

Теперь определяем значение суммарной погрешности (доверительного интервала) измерения уровней выброса ТЧ с ОГ исследуемого автомобиля

$$\Delta g_{\text{ТЧ}} = \sqrt{(\Delta g_{\text{случ.}})^2 + \left(\frac{k_\alpha}{3}\right)^2 \cdot (\Delta g_{\text{сист.}})^2} = \\ = \sqrt{(0{,}09)^2 + 0{,}43 \cdot (0{,}05)^2} \cong 0{,}1 \text{ г/км.} \quad (9)$$

Окончательно записываем значения показателя $g_{\text{ТЧ}}$ при $\alpha = 0{,}95$ с доверительным интервалом и принятым коэффициентом надежности $g_{\text{ТЧ}} = \bar{g}_{\text{ТЧ}} + \Delta g_{\text{ТЧ}} = 0{,}58 + 0{,}1$, г/км.

Относительная погрешность уровней выброса ТЧ с ОГ автомобиля составляет

$$\varepsilon g_{\text{ТЧ}} = \frac{\Delta g_{\text{ТЧ}}}{\bar{g}_{\text{ТЧ}}} \cdot 100 = \frac{0{,}1}{0{,}58} \cdot 100 \cong 17\ \%. \quad (10)$$

Выявление и исключение промахов из серии измерений. Если серия из небольшого числа измерений содержит грубую погрешность – промах, то наличие этого промаха может сильно исказить как среднее значение измеряемой величины, так и границы доверительного интервала. Поэтому из окончательного результата необходимо исключить этот промах. Обычно промах имеет резко отличающееся от других измерений значение. Однако это отклонение не дает еще права исключить это измерение как промах, пока не проверено, не является ли это отклонение следствием статистического разброса.

Для исключения промахов используются следующие критерии:

$$\vartheta_{(1)} = \frac{\bar{a} - a_{(1)}}{\sqrt{\frac{n-1}{n}} \cdot S_{(1)}} \text{ или } \vartheta_{(n)} = \frac{a_{(n)} - \bar{a}}{\sqrt{\frac{n-1}{n}} \cdot S_{(n)}}, \quad (11)$$

где $S_{(1,\,n)} = \sqrt{\dfrac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^{n} (\Delta a_i)^2}$ – это среднеквадратичное отклонение отдельного измерения; $a_{(1)}$, $a_{(n)}$ – соответственно наименьшее и наибольшее значения параметра в серии из n измерений.

В табл. 4 приведены максимальные значения критериев промаха ($\vartheta_{\text{макс.}}$), возникающие вследствие статистического разброса и соответствующие принятому коэффициенту надежности (α).

Таблица 4 Критерии промахов

n	Значения $\vartheta_{\text{макс}}$	
	$\alpha = 0{,}90$	$\alpha = 0{,}95$
3	1,41	1,41
4	1,64	1,69
5	1,79	1,87
6	1,89	2,00
7	1,97	2,09
8	2,04	2,17
9	2,10	2,24
10	2,15	2,29

Если резко выделяющееся значение измерения $a_{(1)}$ или $a_{(n)}$, полученное в серии из n измерений, соответствует неравенству $\vartheta_{(1)} > \vartheta_{\text{макс.}}$ или $\vartheta_{(\text{n})} > \vartheta_{\text{макс.}}$, при принятом значении α, то это означает, что данное значение $a_{(1)}$ или $a_{(n)}$ не совместимо с исходным предположением о нормальном законе распределения и его можно рассматривать как промах. Это измерение следует исключить из серии измерений и определить новое значение $\overline{a}$ и $\Delta a_{\text{случ.}}$ для серии из оставшихся (n-1) измерений. Если же величина $\vartheta_{(1)}$ или $\vartheta_{(n)}$, соответствующая $a_{(1)}$ или $a_{(n)}$, меньше или равна $\vartheta_{\text{макс.}}$ для этого же числа n при заданном α, то это резко выделяющееся значение $a_{(1)}$ или $a_{(n)}$ является следствием статистического разброса и нет оснований считать его промахом.

Пример 3. Проведено семь измерений удельных выбросов БП ($g_{\text{БП}}$) с ОГ автомобиля при его испытании по Европейскому городскому ездовому циклу. Результаты испытаний занесены в табл. 5 ($g_{\text{БП}}$: 0,30; 0,50; 0,54; 0,56; 0,60; 0,70; 1,20 мкг/км). Из этого вариационного ряда резко выделяются два значения: 0,30 и 1,20 мкг/км. Выявление промахов ведем в два этапа.

I. Отбрасываем значение 1,20 и определяем, является ли значение 0,30 промахом. Определяем среднее значение $\overline{g}_{\text{БП}}$ из оставшихся значений удельных уровней выбросов БП

$$\overline{g}_{\text{БП}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{6} g_i = 0{,}53 \text{ мкг/км}. \qquad (12)$$

Находим $\Delta g_i = \overline{g} - g_i$, $(\Delta g_i)^2$ и $\sum_{i=1}^{n} (\Delta g_i)^2$ (табл. 5)

Таблица 5 Исходные данные для расчета

Δg_i	0,23	0,03	–0,01	–0,03	–0,07	–0,17
$(\Delta g_i)^2$	0,0529	0,0009	0,0001	0,0009	0,0021	0,0289

$$\sum_{i=1}^{6} (\Delta g_i)^2 = 0{,}0858. \qquad (13)$$

Определяем среднеквадратическое отклонение отдельного измерения $S_{(1)}$

$$S_{(1)} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^{6} (\Delta g_i)^2} = 0{,}447 \cdot \sqrt{0{,}0858} = 0{,}13.$$

Находим критерий $\vartheta_{(1)}$

$$\vartheta_{(1)} = \frac{\overline{g} - g_{(1)}}{\sqrt{\dfrac{n-1}{n}} \cdot S_{(1)}} = \frac{0{,}53 - 0{,}03}{0{,}91 \cdot 0{,}13} = \frac{0{,}23}{0{,}119} = 1{,}93.$$

Сравниваем полученный результат с табличным значением $\vartheta_{\text{макс.}}$ для $n = 6$ и α = 0,95

$$\vartheta_{\text{макс.}} = 2{,}0 \text{, т. е. } \vartheta_{(1)} < \vartheta_{\text{макс.}}. \qquad (14)$$

Поэтому это значение измерения из вариационного ряда не можем выбросить как промах.

II. Проверяем значение 1,20 на условие промаха. Определяем среднее арифметическое значение показателя $\overline{g}_{\text{БП}}$

$$\overline{g}_{\text{БП}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{7} g_i = 0{,}63. \qquad (15)$$

Далее определяем $\Delta g_i = \overline{g} - g_i$, $(\Delta g_i)^2$ и $\sum_{i=1}^{7} (\Delta g_i)^2$ – (табл. 6).

Таблица 6 Исходные данные для расчета

Δg_i	0,33	0,13	0,03	0,07	0,09	–0,07	–0,57
$(\Delta g_i)^2$	0,109	0,017	0,009	0,005	0,008	0,005	0,325

$$\sum_{i=1}^{7}(\Delta g_i)^2 = 0{,}467\,. \qquad (16)$$

Находим среднеквадратическое отклонение отдельного измерения

$$S_{(n)} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\cdot\sum_{i=1}^{7}(\Delta g_i)^2} = 0{,}279\,. \qquad (17)$$

Находим критерий $\vartheta_{(n)}$

$$\vartheta_{(n)} = \frac{g_{(n)} - \overline{g}}{\sqrt{\frac{n-1}{n}}\cdot S_{(n)}} = \frac{0{,}57}{0{,}258} = 2{,}21\,. \qquad (18)$$

Сравниваем полученный результат с табличным значением $\vartheta_{\text{макс.}}$ для $n = 7$ и $\alpha = 0{,}95$.

$$\vartheta_{\text{макс/}} = 2{,}09\,,\ \text{т. е. } \vartheta_{(n)} > \vartheta_{\text{макс.}}\,. \qquad (19)$$

Поэтому этот результат измерения отбрасывается как промах. Далее проводим статистическую обработку оставленных шести результатов измерений в соответствии со схемой приведенного ранее примера 1.

Погрешности косвенных измерений

Погрешности суммы двух случайных величин $z = a + b$: $\overline{z} = \overline{a} + \overline{b}$ – среднее значение; $\Delta z = \sqrt{(\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}$ – абсолютная и $\varepsilon_z = \dfrac{\Delta z}{\overline{a}+\overline{b}}\cdot 100$ – относительная погрешности, %.

Погрешность разности двух случайных величин $z = a - b$: $\overline{z} = \overline{a} - \overline{b}$ – среднее значение; $\Delta z = \sqrt{(\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}$ – абсолютная и $\varepsilon_z = \dfrac{\Delta z}{\overline{a}-\overline{b}}\cdot 100$ – относительная погрешности, %.

Погрешность произведения двух величин $z = a\cdot b$: $\overline{z} = \overline{a}\cdot\overline{b}$ – среднее значение; $\Delta z = \sqrt{(\overline{b})^2\cdot(\Delta a)^2 + (\overline{a})^2\cdot(\Delta b)^2}$ – абсолютная и $\varepsilon_z = \sqrt{\varepsilon_a^2 + \varepsilon_b^2}$ – относительная погрешности, %.

Погрешность отношения двух величин $z = a/b$: $\overline{z} = \overline{a}/\overline{b}$ – среднее значение; $\Delta z = \sqrt{\dfrac{1}{(\overline{b})^2}\cdot(\Delta a)^2 + \dfrac{(\overline{a})^2}{(\overline{b})^4}\cdot(\Delta b)^2}$ – абсолютная и $\varepsilon_z = \sqrt{\varepsilon_a^2 + \varepsilon_b^2}$ – относительная погрешности, %.

Погрешность возведения в степень величины $z = a^n$: $\overline{z} = (\overline{a})^n$ – среднее значение; $\Delta z = n\cdot(\overline{a})^{n-1}\cdot(\Delta a)$ – абсолютная и $\varepsilon_z = n\cdot\dfrac{\Delta a}{\overline{a}}\cdot 100$ – относительная погрешности, %.

Пример 4. Определить выброс БП ($G_{\text{БП}}$) с ОГ ДВС при его стендовом испытании.

Часовой объемный расход ОГ составляет

$$Q_{\text{ОГ}} = \overline{Q}_{\text{ОГ}} \pm \Delta Q_{\text{ОГ}} = 20 \pm 1\ \text{м}^3\text{/час}. \qquad (20)$$

Измеренные уровни концентраций БП ($C_{\text{БП}}$) в ОГ ДВС приведены в табл. 5. Систематическая погрешность измерения БП составляет $\Delta C_{\text{БП(сист.)}} = 0{,}4$ мкг/м^3.

Таблица 7 Экспериментальные данные

№ п/п	$C_{\text{БП}}$, мкг/м^3	$\Delta C_{\text{БП}}$	$(\Delta C_{\text{БП}})^2$
1.	3,9	0,7	0,49
2.	4,3	0,3	0,09
3.	4,5	0,1	0,01
4.	4,8	–0,2	0,04
5.	5,0	–0,4	0,16
6.	5,2	–0,6	0,36
	$\overline{C}_{\text{БП}} = 4{,}6$		$\sum(\Delta C_{\text{БП}})^2 = 1{,}15$

Среднее значение массового выброса БП с ОГ ДВС составляет

$$\overline{G}_{\text{БП}} = \overline{Q}_{\text{ОГ}}\cdot\overline{C}_{\text{БП}} = 20\times 4{,}6 = 92\ \text{мкг/час}. \qquad (21)$$

Определяем

$$S_{\overline{C}} = \sqrt{\frac{\sum(\Delta g_i)^2}{n\cdot(n-1)}} = \sqrt{\frac{1{,}15}{30}} \cong 0{,}2\,, \qquad (22)$$

и $\Delta C_{\text{БП(случ.)}} = t_\alpha\cdot S_{\overline{C}} = 2{,}57\cdot 0{,}2 \cong 0{,}5$.

Определяем

$$\Delta C_{БП} = \sqrt{(\Delta C_{случ})^2 + \left(\frac{k_\alpha}{3}\right)^2 \cdot (\Delta C_{сист})^2} = \\ = \sqrt{(0{,}5)^2 + 0{,}43 \cdot (0{,}4)^2} \cong 0{,}56. \quad (23)$$

Итак, $C_{БП} = \overline{C}_{БП} + \Delta C_{БП}$ = 4,6 + 0,56, мкг/м^3 при α = 0,95.

Определяем

$$\Delta G_{БП} = \sqrt{(\overline{C}_{БП})^2 \cdot (\Delta \overline{Q}_{ОГ})^2 + (\overline{Q}_{ОГ})^2 \cdot (\Delta C_{БП})^2} = \\ = \sqrt{(4{,}6)^2 \cdot 1^2 + (20)^2 \cdot (0{,}56)^2} \cong 12{,}1 \text{ мкг/час}. \quad (24)$$

Итак, $G_{БП} = \overline{G}_{БП} + \Delta G_{БП} = 92 + 12{,}1$, мкг/час, при α = 0,95.

Относительный интервал неопределенности для часового выброса БП с ОГ ДВС составляет $\varepsilon \cdot G_{БП} = \frac{\Delta G_{БП}}{\overline{G}_{БП}} \cdot 100 = \frac{12{,}1}{92} \cdot 100 = 13\%$.

Выводы

Началом к экологическому испытанию автомобиля с ДВС является сбор, изучение и анализ уже имеющихся данных по его технико-экономическим и экологическим показателям, подготовка методики и программы исследований.

Важнейшей частью экоиспытаний автомобиля является профессиональный подбор и использование современных методик и диагностических комплексов, обеспечивающих необходимую точность измерений.

Инженер-эколог должен глубоко понимать процессы, происходящие в цилиндрах ДВС, и в совершенстве владеть методами планирования и организации эксперимента, математической и компьютерной обработки, анализа и интерпретации полученных результатов.

Литература

1. Канило П. М. Автотранспорт. Топливно-экологические проблемы и перспективы: монография / П. М. Канило. – Х.: ХНАДУ, 2013. –272 с.
2. Канило П. М. Эколого-химические показатели автомобильных ДВС с учетом канцерогенности отработавших газов / П. М. Канило, М. В. Шадрина // Двигатели внутреннего сгорания: сб. научн. трудов. – 2006. – № 2. – С. 154–159.
3. Канило П. М. Интегральные эколого-химические показатели автомобилей с поршневыми двигателями / П. М. Канило, М. В. Сарапина // Автомобильный транспорт: сб. науч. трудов. – 2007. – Вып. 20. – С. 68–74.
4. Канило П. М. Проблемы загрязнения атмосферы городов канцерогенно-мутагенными супертоксикантами / П. М. Канило, В. В. Соловей, К. В. Костенко // Вестник ХНАДУ: сб научн. трудов. – 2011. – Вып. 52. – С. 47–53.
5. Канило П. М. Минимизация канцерогенной опасности автомобилей / П. М. Канило, М. В. Сарапина, К. В. Костенко // Вестн. Харьк. нац. автомоб.-дор. ун-та.: сб. науч. трудов. – 2013. – Вып. 60. – С. 133–142.
6. Канило П. М. Будущее автотранспорта – альтернативные топлива и канцерогенная безопасность / П. М. Канило, М. В. Сарапина // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. – 2013. – Вып. 31. – С. 40–49.
7. Власов К. П. Методы исследований и организация экспериментов / К. П. Власов, П. К. Власов, А. А. Киселева. – Х.: Гуманитарный центр, 2002. – 256 с.
8. Грановский В. А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях / В. А. Грановский, Т. Н. Сирая. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 288.

Рецензент: Ф. И. Абрамчук, профессор, д. т. н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 19 февраля 2014 г.