

УДК 389.14

Т.Б. Гордиенко<sup>1</sup>, О.Н. Величко<sup>2</sup><sup>1</sup>ГП «Украинский научно-исследовательский и учебный центр проблем стандартизации, сертификации и качества», НИИ стандартизации, Киев, Украина<sup>2</sup>Научно-производственный институт метрологического обеспечения измерений электромагнитных величин, Киев, Украина

## НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ МЕТОДИК ОЦЕНКИ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРУ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ОТ МОБИЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ

При проведении оценки выбросов загрязняющих веществ от мобильных источников основой для исследований являются данные о количестве потребленного топлива и коэффициенте выбросов конкретных загрязняющих веществ. Необходимое качество таких оценок выбросов загрязняющих веществ достигается применением соответствующих методик их оценки с установленными процедурами сбора и обработки имеющихся данных и с оцененными их суммарными неопределенностями. Предложены основные подходы для расчета неопределенности методик оценки выбросов в атмосферу загрязняющих веществ от мобильных источников с применением положений международного Руководства по выражению неопределенности измерений.

**Ключевые слова:** неопределенность, загрязняющие вещества, мобильные источники.

### Введение

Более точная и достоверная оценка выбросов загрязняющих веществ (ЗВ) в атмосферу способствует подготовке и реализации более эффективных мероприятий по защите окружающей среды. С учетом все возрастающих объемов выбросов в атмосферный воздух от мобильных источников (автомобилей, локомотивов, тепловозов, самолетов и т. п.) значительно возрастает роль достоверной оценки выбросов именно от этих источников ЗВ. При этом важным элементом анализа таких выбросов является оценка полученных результатов, в т.ч. оценка суммарной неопределенности и ее основных составляющих с целью их дальнейшей минимизации.

Сложность и необходимые объемы расчетов при оценке неопределенности в соответствии с требованиями международного Руководства по выражению неопределенности измерений (далее – Руководство GUM) [1, 2] требуют значительных ресурсов лабораторий или организаций, которые занимаются оценкой выбросов ЗВ. Поэтому актуальным является разработка и применение специальных методик оценки выбросов ЗВ с оцененной их суммарной неопределенностью.

### Основной материал

**1. Основные методики оценки выбросов загрязняющих веществ.** Существует ряд методик оценки выбросов ЗВ от мобильных источников (МИ) [3 – 5]. Некоторые из них для МИ железнодорожного транспорта описаны в [5].

В самом общем случае суммарные выбросы ЗВ  $E_{ЗВ}$  от МИ можно рассчитать по такой формуле, кг (г):

$$E_{ЗВ} = \sum_i \sum_q (EF_{iq} \cdot AD_{iq}), \quad (1)$$

где  $i$  – разновидность анализируемого компонента ЗВ ( $NO_x$ ,  $N_2O$ ,  $CO$ ,  $CH$ ,  $CH_4$ ,  $NO_3$ ,  $SO_2$  и др.);  $q$  – вид используемого топлива МИ;  $EF_{iq}$  – коэффициент выбросов  $i$ -го компонента ЗВ на единицу топлива  $q$ , кг/т (г/кг);  $AD_{iq}$  – затраты топлива  $q$ , т (кг).

Довольно часто, при расчетах выбросов компонентов ЗВ применяют обобщенный коэффициент выбросов (КВ) ЗВ  $EF_i$ , который представляет собой среднюю удельную величину выбросов  $i$ -го компонента ЗВ для определенной технологии сжигания топлива, определенной категории двигателя, определенного вида топлива без учета особенностей его химического состава. Обобщенные КВ ЗВ для дизельных двигателей ряда МИ регламентирует Руководство CORINAIR [3], которые используются при отсутствии у пользователя более конкретных данных об этих КВ.

Для более точных оценок выбросов ЗВ применяют специфические КВ ЗВ  $EF_i$ , то есть удельные величины выбросов  $i$ -х компонентов ЗВ, которые определяется для конкретных характеристик процесса сгорания, конкретного типа двигателя с учетом индивидуальных характеристик топлива (бензин; сжиженный нефтяной газ; дизельное топливо; сжатый природный газ, мазут и т. д.). Использование специфических КВ ЗВ способствует повышению общей точности расчета составляющих суммарных выбросов ЗВ и, соответственно, уменьшению неопределенности связанных с ними составляющих суммарной неопределенности.

Более точные методики оценки выбросов ЗВ от МИ, находящихся в эксплуатации, используют комплексный подход Руководства CORINAIR [3] и данные об их эксплуатации МИ [5]. При этом учитываются данные о типе дизельного двигателя МИ с уче-

том срока его эксплуатации и мощности, а также о количестве рабочих часов в году каждого МИ в зависимости от индивидуального режима его работы.

В этом случае суммарные выбросы ЗВ  $E_{ЗВ}$  от МИ рассчитываются по следующей формуле, кг (г):

$$E_{ЗВ} = \sum_i \sum_j \sum_q (EF_{ijq} \cdot N_{jq} \cdot T_{jq} \cdot P_{jq} \cdot LF_{jq}), \quad (2)$$

где  $j$  – разновидность МИ;  $EF_{ijq}$  – средняя величина выбросов  $i$ -го компонента ЗВ для конкретного двигателя и топлива (зависит от срока эксплуатации и мощности двигателя), г/кВт·час;  $N_{jq}$  – количество соответствующей разновидности МИ;  $T_{jq}$  – количество рабочих часов в году соответствующего МИ;  $P_{jq}$  – средняя мощность двигателя соответствующих МИ, кВт;  $LF_{jq}$  – типовой коэффициент загрузки соответствующего МИ (для номинальных оборотов – 0,25; для промежуточных – 0,15; для режима холодного хода – 0,6).

Например, значения среднеэксплуатационных удельных выбросов ЗВ МИ железнодорожного транспорта определяются по ГСТУ 32.001 [6]. На основе имеющихся данных рассчитаны значения КВ компонентов ЗВ  $EF_i$  для конкретных локомотивов с учетом их типа и мощности дизельного двигателя [5]. Эти рассчитанные значения КВ компонентов ЗВ  $EF_i$  для локомотивов, которые эксплуатируются на железных дорогах стран СНГ и Восточной Европы, применены в Руководстве IPCC 2006 [4].

**2. Основные подходы к расчету неопределенности методики оценки выбросов.** В общем случае расчет суммарных неопределенностей методик выбросов ЗВ осуществляется в соответствии с положениями Руководства GUM [1, 2]. Для этого целесообразно применить соответствующий алгоритм, приведенный в [7]. К типовым составляющим суммарной неопределенности методик оценки выбросов ЗВ относятся источники, указанные в [8], где приведены также и специфические составляющие неопределенности.

Прагматический подход к оценке суммарной неопределенности методики оценки выбросов ЗВ состоит в оценке имеющихся данных, полученных либо в результате прямых измерений, либо на основе необходимых расчетов и экспертных оценок.

Для качественной оценки составляющих суммарной неопределенности целесообразно применять причинно-следственную диаграмму Исикавы, позволяющую осуществить качественный анализ составляющих неопределенности методик оценки выбросов ЗВ для последующей их количественной оценки как составляющих суммарной неопределенности [9].

На рис. 1 приведена диаграмма Исикавы для определения первичных и вторичных факторов, влияющих на уровень неопределенности методик оценки выбросов ЗВ. К первичным факторам отнесены: данные о КВ компонентов ЗВ и данные о потреблении МИ конкретного вида топлива. Каждый из

первичных факторов, в свою очередь, включает соответствующие вторичные факторы, которые обозначены стрелками, касательными к первичным факторам. Эти вторичные факторы как составляющие суммарной неопределенности расшифрованы под рис. 1.

Для конкретной методики оценки выбросов ЗВ целесообразно провести анализ каждого из вторичных факторов, приведенных на рис. 1. Так как не все из выявленных факторов вносят значимый вклад в суммарную неопределенность, то на практике, число основных составляющих неопределенности бывает незначительным. Поэтому те из них, которые по своей величине меньше одной трети самой большой составляющей, можно вообще исключить из рассмотрения.

При осуществлении предварительной оценки вклада каждой из составляющих неопределенности или суммы нескольких ее составляющих теми вторичными факторами, которые оказались незначительными, пренебрегают. На этом этапе быстро выявляются наиболее важные составляющие неопределенности, и найденное значение суммарной неопределенности почти целиком определяется именно этими основными вкладами. Поэтому, достаточно хорошую оценку суммарной неопределенности можно получить, сосредоточив усилия на анализе основных ее составляющих.

Неопределенность данных, полученные в результате прямых измерений, зависят от использованных средств измерения, условий измерения и т. п. Неопределенность данных, взятых из внешних источников, зависит от точности этих данных, полноты охвата и корректного определения основных источников выбросов ЗВ.

Для тех составляющих неопределенности, которые не отражены или недостаточно полно отражены в имеющихся данных, необходимо найти в соответствующих международных или региональных руководствах и стандартах дополнительную информацию, или же запланировать проведение экспериментов для получения необходимых данных. Это могут быть специальные исследования какого-либо одной составляющей неопределенности или исследования необходимых характеристик, обеспечивающие определение представительного изменения существенных факторов.

Результаты измерения с целью установления КВ определенных компонентов ЗВ при использовании конкретного вида топлива (бензин; сжиженный нефтяной газ; дизельное топливо; сжатый природный газ, мазут) в условиях, отличающихся от нормальных, также являются источниками дополнительной неопределенности. Поэтому, корректное определение КВ компонентов ЗВ позволяет минимизировать эту составляющую неопределенности.

Основные этапы оценки расширенной стандартной неопределенности методик оценки выбросов ЗВ соответствуют этапам обобщенного алгоритма оценки суммарной неопределенности, приведенных в [9].



Рис. 1. Диаграмма Исикавы для определения составляющих суммарной неопределенности методик расчета выбросов в атмосферу ЗВ от мобильных источников:

1.1 – вариации показаний результата измерений с помощью средств измерений (СИ); 1.2 – нелинейность характеристики СИ; 1.3 – конечная разрешающая способность СИ или его порог чувствительности; 1.4 – дополнительные вариации СИ в условиях, отличных от нормальных; 1.5 – повторяемость измерений; 1.6 – субъективные факторы;  
 2.1 – справочные данные, типовые значения; 2.2 – физические постоянные; 2.3 – данные калибровки применяемых рабочих СИ; 2.4 – данные сертификации применяемых стандартных образцов; 2.5 – расчетные методы, аппроксимации и допущения; 2.6 – программное обеспечение;  
 3.1 – разновидность МИ; 3.2 – разновидность анализируемого компонента ЗВ; 3.3 – вид используемого топлива; 3.4 – характеристики сгораемого топлива; 3.5 – тип используемого двигателя МИ; 3.6 – мощность и срок эксплуатации используемого двигателя МИ

Таблица 1

Бюджет неопределенности для методик оценки выбросов ЗВ от мобильных источников

Входная величина, $X_i$	Оценка входной величины, $x_i$	Стандартная неопределенность, $u(x_i)$	Тип неопределенности	Распределение вероятностей входной величины	Коэффициент чувствительности, $c_i$	Вклад неопределенности, $u_i(y)$
$X_1$	$x_1$	$u(x_1)$	A		$c_1$	$u_1(y)$
...	...	...	...	...	...	...
$X_j$	$x_j$	$u(x_j)$	A		$c_j$	$u_j(y)$
$X_l$	$x_l$	$u(x_l)$	B		$c_l$	$u_l(y)$
...	...	...	...	...	...	...
$X_N$	$x_N$	$u(x_N)$	B		$c_N$	$u_N(y)$
Y	y					$u(y)$

Одним из важных этапов расчета неопределенности методик оценки есть составление необходимого бюджета неопределенности (табл. 1) с учетом составляющих, приведенных на рис. 1.

Расчет составляющих неопределенности данных, полученных путем прямых измерений (по типу А),  $u_A$  осуществляют с помощью формул:

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}}; s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2}; \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k, \quad (3)$$

где  $s$  – стандартное отклонение;  $n$  – количество измерений.

Расчет составляющих неопределенности дан-

ных, полученных из внешних источников (по типу В),  $u_B$  осуществляют по формуле:

$$u_B = U/k, \quad (4)$$

где  $U$  – расширенная неопределенность, отображенная в сертификате калибровки СИ;  $k$  – коэффициент охвата (как правило,  $k = 2$ ).

Суммарную стандартную неопределенность  $u_c$  без учета корреляции входных величин рассчитывают с помощью формул:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m c_i^2 u^2(x_i)}; c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}, i = 1, 2, \dots, m, \quad (5)$$

где  $c_i$  – коэффициент чувствительности каждой из составляющих неопределенности;  $u(x_i)$  – стандартные неопределенности входных величин;  $x_1, x_2, \dots, x_m$ ,  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$  – оценки входных и выходной величин.

Расчет суммарной стандартной неопределенности  $u_c$  с учетом разделения составляющих неопределенности по типам А и В осуществляют по формуле:

$$u_c = \sqrt{u_A(y)^2 + u_B(y)^2} = \sqrt{\sum_1^j [u_j(y)]^2 + \sum_1^N [u_1(y)]^2} \quad (6)$$

Расширенную неопределенность  $U$  рассчитывают по формуле:

$$U = k \cdot u_c \quad (7)$$

Полный результат прямых измерений (например, потребления топлива, коэффициентов выбросов ЗВ и т. д.) состоит из оценки измеряемой величины  $y$  и относящейся к ней расширенной неопределенностью  $U$ :

$$Y = y \pm U \quad (8)$$

### Выводы

Методики оценки выбросов в атмосферу загрязняющих веществ от мобильных источников применяют в зависимости от имеющихся входных данных с учетом необходимой точности таких расчетов и их неопределенности.

Для более достоверного учета существенных составляющих суммарной неопределенности методик оценки выбросов загрязняющих веществ от мобильных источников целесообразно использовать причинно-следственную диаграмму Исикавы, которая позволяет осуществить качественный анализ составляющих суммарной неопределенности.

Предложенный в статье подход целесообразно использовать для расчета неопределенности

методик оценки выбросов загрязняющих веществ от мобильных источников.

### Список литературы

1. *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM 1993): First edition.* – ISO. – Switzerland, 1993. – 101 p.
2. *Руководство по выражению неопределенности измерения / Пер. с англ. под науч. ред. проф. В.А. Слава.* – С.-Пб.: ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, 1999. – 134 с.
3. *Joint EMEP/CORINAIR Atmospheric Emission Inventory Guidebook.* – 3th Edition, September 2003 Update. – EEA. – Copenhagen, 2003.
4. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.* – Vol. 1–5. – IPCC, 2006.
5. Величко О.Н., Гордиенко Т.Б. Неопределенность методик оценки выбросов в атмосферу загрязняющих веществ на железнодорожном транспорте // *Система обробки інформації.* – Х.: ХУ ПС. – 2006. – Вип. 7 (56). – С. 13-18.
6. ГСТУ 32.001-94. Викиди забруднюючих речовин з відпрацьованими газами тепловозних дизелів. Норми і методи визначення.
7. Гордиенко Т.Б. Основные подходы к оценке неопределенности в экологических и метрологических руководства // *Система обробки інформації.* – Х.: ХУ ПС, 2007. – Вип. 6 (64). – С. 25-29.
8. Величко О.Н., Гордиенко Т.Б. Сравнение оценки неопределенности в международных метрологических и экологических руководства // *Измерит. техника.* – 2007. – № 5. – С. 22-26.
9. Гордиенко Т.Б. Идентификация составляющих неопределенности при оценке выбросов парниковых газов // *Тез. докл. Междунар. конф. "Метрология и метрологическое обеспечение".* – Минск. – 2007. – С. 67-71.

Поступила в редколлегию 12.04.2008

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. И.П. Захаров, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

### НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ МЕТОДИК ОЦІНЮВАННЯ ВИКИДІВ В АТМОСФЕРУ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН ВІД МОБІЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ

Гордієнко Т.Б., Величко О.М.

При проведенні оцінки викидів забруднюючих речовин від мобільних джерел основою для досліджень є дані про кількість спожитого палива і коефіцієнт викидів конкретних забруднюючих речовин. Необхідна якість таких оцінок викидів забруднюючих речовин досягається шляхом застосування відповідних методик їх оцінки із встановленими процедурами збору і обробки наявних даних і з оціненими їх сумарними невизначеностями. Запропоновані основні підходи для розрахунку невизначеності методик оцінки викидів забруднюючих речовин у атмосферу від мобільних джерел із застосуванням положень міжнародного Керівництва із вираження невизначеності вимірювань.

**Ключові слова:** невизначеність, забруднюючі речовини, мобільні джерела.

### UNCERTAINTY OF THE METHODS OF THE ESTIMATION OF EMISSION IN ATMOSPHERE POLLUTANTS FROM MOBILE SOURCES

Gordiyenko T.B., Velychko O.N.

When undertaking the emission estimation of pollutants from mobile sources by basic for studies data about consumed fuel and emission factor concrete pollutants are given. The necessities quality such estimation of pollutants by using corresponding to methods of their estimation with installed procedure of the collection and processing available data and with evaluated their total uncertainty is reached. The main approaches for calculation uncertainty of methods of the emission estimation of pollutants in atmosphere from mobile sources with using the positions international Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement is offered.

**Keywords:** vagueness, contaminating matters, mobile sources.