

---

УДК 006.015

В.А. Донбаева, Б.Т. Айткешева

*РГП «Казахстанский институт метрологии», Астана, Республика Казахстан*

## **ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЗАПЫЛЕННОСТИ ГАЗОПЫЛЕВЫХ ПОТОКОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСОВ**

*Рассматривается процедура поэтапной оценки неопределенности при определении запыленности газопылевых потоков промышленных выбросов, проведенная при определении запыленности газопылевых потоков, исходящих из котельной, отапливающей административное здание в г.Астане.*

**Ключевые слова:** *неопределенность измерения, запыленность газопылевых потоков, объемная скорость газа.*

### **Введение**

**Постановка проблемы.** Проведение оценки неопределенности измерений для испытательных лабораторий при аккредитации согласно требований СТ РК ИСО 17025-2007 «Общие требования к ква-

лификации испытательных и калибровочных лабораторий» часто представляет для них сложную задачу. В статье рассмотрена процедура поэтапной оценки неопределенности, проведенная для экологической лаборатории, определяющей запыленность газопылевых потоков промышленных выбросов.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Оценка неопределенности была проведена, согласно принципам изложенным в Руководстве по оценке неопределенности измерений [1] и РМГ [2], а также другие источники [3], [4].

**Формулирование цели статьи.** Оценка неопределенности запыленности газопылевых потоков проводится лабораторией согласно нормативному документу СТ РК ГОСТ Р 50820-2005 [5].

### Изложение основного материала

Определение запыленности газа определяется расчетным методом по рассчитанному ранее объему газовой пробы при нормальных условиях и измеренному весу пыли, осажденной в аллонже. За вес пыли принимают среднее из измерений веса трех аллонжей

В статье предложен метод оценки неопределенности измерений и способ оценки. Рекомендуются сложную задачу разложить на более простые и провести оценку неопределенности поэтапно.

Математическая модель измерения запыленности газа  $Z$ , выраженная в  $г/м^3$ : определяется по формуле:

$$Z = \frac{G \cdot 1000}{Q_0}, \quad (1)$$

где  $Q_0$  – объем газовой пробы при нормальных условиях, л/мин.;  $G$  – вес пыли, осажденной в аллонже, г.

В свою очередь, объем газовой пробы при нормальных условиях определяется по формуле:

$$Q_0 = 0,66 \cdot Q \cdot \tau \cdot \sqrt{\frac{B \pm P_p}{\gamma_0 \cdot (273 + t_p)}} \quad (2)$$

где  $Q$  – объемная скорость (показания реометра), л/мин.;  $\tau$  – продолжительность опыта, мин.;  $\gamma_0$  – удельный вес воздуха при нормальных условиях,  $кг/м^3$ ;  $B$  – барометрическое (атмосферное) давление воздуха, мм рт.ст.;  $P_p$  – давление (+) или разрежение (-) газа у реометра, мм рт.ст.;  $t_p$  – температура газа у реометра, °С;

Объемная скорость газа определяется по формуле

$$Q = 0,19 \cdot d_n^2 \sqrt{P_d} \sqrt{\frac{(B \pm P_r) \cdot (273 + t_p)}{(B \pm P_p) \cdot (273 + t_r)}} \quad (3)$$

где  $Q$  – объемная скорость газа, л/мин.;  $d_n$  – диаметр заборного отверстия носика аллонжа, мм;  $P_d$  – динамическое давление газа (единицы измерения не прописаны);  $B$  – атмосферное давление воздуха мм рт.ст,  $P_r$  – давление (+) или разрежение (-) газа в месте отбора пробы в газоходе, мм рт.ст.;  $t_r$  – температура газа в месте отбора пробы (в газоходе), °С;  $P$  – давление (+) или разрежение (-) газа у реометра;  $t_p$  – температура газа у реометра, °С.

Таким образом, для оценки запыленности газопылевых потоков необходимо поэтапно оценить

неопределенность измерений по формуле (3), затем (2) и только потом можно оценить неопределенность определения запыленности.

**Первый этап** оценки неопределенности будет включать определение объемной скорости отбора газа расчетным методом по проведенным измерениям динамического давления газа, давления газа в месте отбора пробы, давления газа у реометра, температуры газа в месте отбора проб и у реометра, а также барометрического давления. Диаметр заборного отверстия аллонжа задается производителем.

Применяемые средства измерений:

Барометр–анероид БАММ, диапазон измерений (80-106) кПа, погрешность  $\pm 0,2$  кПа. Мановакууметр двухтрубный для измерения избыточного давления, диапазон измерений от 0 до 1000 Па, погрешность  $\pm 10$  Па. Трубки напорные модификации НИИОГАЗ и ПИТО, относительная погрешность определения коэффициента трубки  $\delta_{tv} = 1,3\%$ , коэффициент напорной трубки  $K_m = 0,583$ . Микроманометр ММН-2400(5)-1,0; предел допускаемой абсолютной основной погрешности измерений  $\Delta_m \pm 6$  Па = 0,045 мм рт.ст., цена деления шкалы  $a=2$  Па= 0,015 мм рт.ст. Барометр-анероид метеорологический БАММ-1, пределы основной допускаемой погрешности  $\Delta_B \pm 0,2$  кПа (1,5 мм рт.ст.), цена деления шкалы  $a_B = 0,1$  кПа (0,5 мм рт.ст). Термометр технический стеклянный ТТ, диапазон измерений (-35 – 200)°С, погрешность  $\pm 1$ °С. Трубки напорные, диапазон измерений (4 – 21) м/с, погрешность  $\pm 5\%$ . Весы лабораторные равноплечие 2 класса модели ВЛР-200 г, цена деления 0,05 мг, допускаемая погрешность взвешивания до 25 г -  $\pm 0,25$  мг. Диаметр заборного отверстия носика аллонжа 4 мм (задается производителем).

Входными величинами являются следующие семь величин:  $d_n, P_d, B, P_r, t_r, P_p, t_p$ .

**1. Неопределенность измерения  $u(d_n)$**  диаметра заборного отверстия носика аллонжа оценивается, учитывая точность задания диаметра производителем (4 мм):  $u_B(d_n) = \frac{1}{2\sqrt{3}} = 0,289$ мм.

**2. Динамическое давление газа** вычисляют как

$$P_d = p \cdot \beta \cdot K_m, \quad (4)$$

где  $p$  – отсчет по шкале манометра;  $\beta$  – коэффициент, зависящий от угла наклона измерительной трубки микроманометра;  $K_m$  – коэффициент напорной трубки.

Неопределенность  $P_d$  может быть оценена, используя относительные неопределенности входных величин:

$$u_c(P_d) = P_d \times \sqrt{\left(\frac{u(p)}{p}\right)^2 + \left(\frac{u_B(\beta)}{\beta}\right)^2 + \left(\frac{u(K_m)}{K_m}\right)^2} = 0,0958.$$

В свою очередь, суммарная стандартная неопределенность измерения давления микроманометром будет состоять из трех составляющих:

$$u(p) = \sqrt{(u_B^I(p))^2 + (u_B^{II}(p))^2 + u_A^2(p)} = 0,169 \text{ мм рт.ст.},$$

учитывающих:

- погрешность микроманометра  $\Delta_M$

$$u_B^I(p) = \frac{\Delta_M}{\sqrt{3}} = 0,026 \text{ мм рт.ст.}$$

- дискретность шкалы манометра а:

$$u_B^{II}(p) = \frac{a}{2\sqrt{3}} = 0,0043 \text{ мм рт.ст.}$$

- оценка по типу А при проведении многократных измерений:

$$u_A(p) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2}{n(n-1)}} = 0,167 \text{ мм рт.ст.}$$

Неопределенность коэффициента  $\beta$  оценивается, учитывая последний разряд числа b:

$$u_B(\beta) = \frac{b}{\sqrt{3}} = 0,0578.$$

Неопределенность коэффициента напорной трубки  $K_m$  оценивается, учитывая относительную погрешность определения коэффициента трубки  $\delta_{tv}$ :

$$u_B(K_m) = \frac{K_m \cdot \delta_{tv}}{100\% \cdot \sqrt{3}} = 0,0167.$$

**3. Неопределенность измерения барометрического давления В** оценивается двумя составляющими:

$$u(B) = \sqrt{(u_B^I(B))^2 + (u_B^{II}(B))^2} = 0,878 \text{ мм рт.ст.},$$

- учитывая основную погрешность барометра:

$$u_B^I(B) = \frac{\Delta_B}{\sqrt{3}} = 0,8661 \text{ мм рт.ст.},$$

- учитывая цену деления барометра  $a_B$ :

$$u_B^{II}(B) = \frac{a_B}{2\sqrt{3}} = 0,1445 \text{ мм рт.ст.}$$

**4. Неопределенность давления в газоходе  $P_\Gamma$** , и в месте отбора  $P_p$  оценивается двумя составляющими по типу В:

- принимая во внимание погрешность мановакуумметра  $\pm \Delta_M$ :

$$u_B^I(P_\Gamma) = \frac{\Delta_M}{\sqrt{3}} = 0,0865 \text{ мм рт.ст.}$$

- учитывая цену деления  $a_p$  микроманометра:

$$u_B^{II}(P_\Gamma) = \frac{a_p}{2\sqrt{3}} = 0,1445 \text{ мм рт.ст.}$$

Стандартная неопределенность измерения давления  $P_\Gamma$  микроманометром будет равна:

$$u(P_\Gamma) = \sqrt{(u_B^I(P_\Gamma))^2 + (u_B^{II}(P_\Gamma))^2} = 0,08917 \text{ мм рт.ст.}$$

## 5. Неопределенность измерения температур

$t_\Gamma$  оценивается тремя составляющими:

- учитывая погрешность термометра  $\Delta_\Gamma$ :

$$u_B^I(t_\Gamma) = \frac{\Delta_\Gamma}{\sqrt{3}} = 0,577^\circ\text{C};$$

- учитывая цену деления термометра:

$$u_B^{II}(t_\Gamma) = \frac{a_\Gamma}{2\sqrt{3}} = 0,2887^\circ\text{C};$$

- по типу А:

$$u_A(t_\Gamma) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_{\Gamma i} - \bar{t}_\Gamma)^2}{m(n-1)}} = 0,991^\circ\text{C}.$$

Неопределенность измерения температуры в газоходе  $t_\Gamma$  равна:

$$u(t_\Gamma) = u(t_p) = \sqrt{(u_B^I(t_\Gamma))^2 + (u_B^{II}(t_\Gamma))^2 + u_A^2(t_\Gamma)} = 1,398^\circ\text{C}.$$

Расчет коэффициентов чувствительности входных величин:

$$c_{d_H} = \frac{\partial Q}{\partial d_H} = 2 \cdot 0,19 \cdot d_H \sqrt{P_D} \times$$

$$\times \sqrt{\frac{(B + P_\Gamma) \cdot (273 + t_p)}{(B + P_p) \cdot (273 + t_\Gamma)}} = 1,15;$$

$$c_{P_D} = \frac{\partial Q}{\partial P_D} = \frac{1}{2\sqrt{P_D}} \cdot 0,19 \cdot d_H^2 \times$$

$$\times \sqrt{\frac{(B + P_\Gamma) \cdot (273 + t_p)}{(B + P_p) \cdot (273 + t_\Gamma)}} = 1,65;$$

$$c_B = \frac{\partial Q}{\partial B} = -\frac{1}{2} \cdot 0,19 \cdot d_H^2 \sqrt{P_D} \frac{(P_\Gamma + P_p)}{(B + P_p)} \times$$

$$\times \sqrt{\frac{(273 + t_p)}{(B + P_\Gamma)(B + P_p)(273 + t_\Gamma)}} = 1,23 \cdot 10^{-5};$$

$$c_{P_\Gamma} = \frac{\partial Q}{\partial P_\Gamma} = \frac{1}{2} \cdot 0,19 \cdot d_H^2 \sqrt{P_D} \times$$

$$\times \sqrt{\frac{(273 + t_p)}{(B + P_p) \cdot (273 + t_\Gamma) \cdot (B + P_\Gamma)}} = 3,1 \cdot 10^{-3};$$

$$c_{P_p} = \frac{\partial Q}{\partial P_p} = -\frac{1}{2(B + P_p)} \cdot 0,19 \cdot d_H^2 \sqrt{P_D} \times$$

$$\times \sqrt{\frac{(B + P_\Gamma)(273 + t_p)}{(273 + t_\Gamma)(B + P_p)}} = -1,55 \cdot 10^{-3};$$

$$c_{t_p} = \frac{\partial Q}{\partial t_p} = 0,19 \cdot d_H^2 \sqrt{P_D} \cdot \frac{1}{2} \times$$

$$\times \sqrt{\frac{(B + P_\Gamma)}{(B + P_p) \cdot (273 + t_\Gamma)(273 + t_p)}} = 3,86 \cdot 10^{-3};$$

$$c_{t_\Gamma} = \frac{\partial Q}{\partial t_\Gamma} = -0,19 \cdot d_H^2 \sqrt{P_D} \cdot \frac{1}{2 \cdot (273 + t_\Gamma)} \times$$

$$\times \sqrt{\frac{(B + P_{\Gamma}) \cdot (273 + t_p)}{(B + P_p) \cdot (273 + t_{\Gamma})}} = -3,17 \cdot 10^{-3};$$

Суммарная стандартная неопределенность показаний реометра (объемной скорости газа) рассчитывается по формуле:

$$u_c(Q) = \sqrt{c_{d_H}^2 u^2(d_H) + c_{P_D}^2 u^2(P_D) + c_B^2 u^2(B) + c_{P_{\Gamma}}^2 u^2(P_{\Gamma}) + c_{P_p}^2 u^2(P_p) + c_{t_p}^2 u^2(t_p) + c_{t_{\Gamma}}^2 u^2(t_{\Gamma})}$$

**Бюджет неопределенности 1-го этапа**

Величина $X_i$	Оценка $x_i$	Стандарт. неопределенность, $u(x_i)$	Коеф. чувствительн., $c_i$	Вклад неопред. $c_i u(x_i)$
$d_H$	4 мм	0,289	1,15	0,3320
$P_D$	0,70	0,0958	1,65	0,1869
$B$	740,6	0,1133	$-1,23 \cdot 10^{-5}$	$-1,083 \cdot 10^{-5}$
$P_{\Gamma}$	3,70	0,878	$1,55 \cdot 10^{-3}$	$1,138 \cdot 10^{-5}$
$P_p$	2,2	0,08917	$1,55 \cdot 10^{-3}$	$1,138 \cdot 10^{-5}$
$t_{\Gamma}$	26°C	1,398	$3,86 \cdot 10^{-3}$	$3,86 \cdot 10^{-3}$
$t_p$	91°C	1,398	$3,17 \cdot 10^{-3}$	$3,86 \cdot 10^{-3}$
$Q$	2,31		$u(Q)$	0,381

**Второй этап** оценки неопределенности включает определение объем газовой пробы при нормальных условиях расчетным методом по формуле:

$$Q_0 = 0,66 \cdot Q \cdot \tau \cdot \sqrt{\frac{B \pm P_p}{\gamma_0 \cdot (273 + t_p)}}, \quad (3)$$

где  $Q_0$  – объем газовой пробы, л/мин.;  $Q$  – объемная скорость, л/мин.;  $\tau$  – продолжительность опыта, мин.;  $\gamma_0$  – удельный вес воздуха при нормальных условиях, кг/м<sup>3</sup>;  $B$  – барометрическое давление воздуха, мм рт.ст.;  $P_p$  – давление или разрежение газа у реометра;  $t_p$  – температура газа у реометра, °C.

Продолжительность измерений определяется секундомером механическим СОПпр-2а-3-000. Цена деления шкалы: секундной 0,2 с, минутной – 1 мин. Допустимая погрешность в диапазоне рабочих температур  $\pm 4,8$  сек. Измерения проводились в течение 20 минут.

1. Неопределенность вычислений показаний реометра  $Q$  оценена ранее.

2. Неопределенность измерения продолжительности опыта  $\tau$  оценивается тремя составляющими:

- учитывая погрешность секундомера  $\Delta_{\tau}$ ;

$$u_B^I(\tau) = \frac{\Delta_{\tau}}{\sqrt{3}} = \frac{4,8}{\sqrt{3}} = 2,771 \text{ сек.};$$

- учитывая цену деления шкалы секундомера  $a_{\tau}$ ,

$$u_B^{II}(\tau) = \frac{a_{\tau}}{2\sqrt{3}} = \frac{0,2}{2\sqrt{3}} = 0,058 \text{ сек.};$$

- по типу А, оценив точность отсчета периода оператором:

$$u_A(\tau) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tau_i - \bar{\tau})^2}{n(n-1)}} = 1,01 \text{ с.}$$

Суммарная стандартная неопределенность измерения продолжительности опыта будет равна:

$$u(\tau) = \sqrt{(2,771)^2 + (0,058)^2 + (1,01)^2} = 2,95 \text{ с.}$$

3. Неопределенность, связанную с точностью представления удельного веса воздуха при нормальных условиях, можно оценить по типу В, учитывая единицу последнего разряда числа  $x_0$ :

$$u_B(\gamma_0) = \frac{x_0}{2\sqrt{3}} = \frac{0,01}{2\sqrt{3}} = 0,0029.$$

4. Неопределенности измерений  $B$ ,  $P_p$ ,  $t_p$  оценены на первом этапе.

Расчет коэффициентов чувствительности для входных величин

$$c_Q = \frac{\partial Q_0}{\partial Q} = 0,66 \cdot \tau \times$$

$$\times \sqrt{\frac{(B \pm P_p)}{\gamma_0 \cdot (273 + t_p)}} = 18,32;$$

$$c_{\tau} = \frac{\partial Q_0}{\partial \tau} = 0,66 \cdot Q \times$$

$$\times \sqrt{\frac{(B \pm P_p)}{\gamma_0 \cdot (273 + t_p)}} = 0,63;$$

$$c_B = \frac{\partial Q_0}{\partial B} = 0,33 \cdot Q \cdot \tau \times$$

$$\times \sqrt{\frac{1}{(B \pm P_p) \gamma_0 (273 + t_p)}} = 0,0285;$$

$$c_{P_p} = \frac{\partial Q_0}{\partial P_p} = 0,33 \cdot Q \cdot \tau \times$$

$$\times \sqrt{\frac{1}{(B \pm P_p) \gamma_0 (273 + t_p)}} = 0,0285;$$

$$c_{\gamma_0} = \frac{\partial Q_0}{\partial \gamma_0} = -0,33 \cdot Q \cdot \tau \cdot \frac{1}{\gamma_0} \times$$

$$\times \sqrt{\frac{(B \pm P_p)}{\gamma_0 (273 + t_p)}} = -16,4;$$

$$c_{t_p} = \frac{\partial Q_0}{\partial t_p} = -0,33 \cdot Q \cdot \tau \cdot \frac{1}{(273 + t_p)} \times$$

$$\times \sqrt{(B \pm P_p) / (273 + t_p)} = -0,071.$$

**Бюджет неопределенности 2-го этапа**

Величина $X_i$	Оценка, $x_i$	Станд. неопредел. $u(x_i)$	Коеф. чувств., $c_i$	Вклад неопред. $c_i u(x_i)$
Q	2,31	0,38	18,32	6,96
$\tau$	20	0,0491	0,63	0,0309
B	740,6	0,878	0,0285	0,025
$P_p$	2,2	0,08917	0,0285	0,00254
$\gamma_0$	1,29	0,0029	-16,400	-0,0476
$t_p$	26°C	1°C	-0,071	-0,071
$Q_0$	42,34		$u(Q_0)$	14,019

**Третий этап.** Для оценки неопределенности запыленности газа по формуле (1) необходимо только оценить неопределенность измерения веса пыли G, которая измеряется взвешиванием на весах лабораторных модели ВЛР-200, цена деления 0,05 мг, погрешность взвешивания  $\pm 0,15$  мг, оценивается тремя составляющими:

- учитывая погрешности весов  $\Delta_G$ :

$$u_B^I(G) = \frac{\Delta_G}{\sqrt{3}} = 0,0899;$$

- цену деления весов  $a_G$ :

$$u_B^{II}(G) = \frac{a_G}{2\sqrt{3}} = 0,0144;$$

- по типу А, учитывая, что вес пыли, определяется средним из трех измерений ( $m=3$ ):

$$u_A(G) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})^2}{m(n-1)}} = 0,0442;$$

Суммарная стандартная неопределенность измерения веса пыли будет равна:

$$u(G) = \sqrt{(u_B^I(G))^2 + (u_B^{II}(G))^2 + u_A^2(G)} = 0,0982.$$

**Бюджет неопределенности 3-го этапа**

Величина $X_i$	Оценка, $x_i$	Стандартная неопределен., $u(x_i)$	Относител. неопред. $\frac{u(x_i)}{x_i}$
G	0,12	0,0982	0,818
$Q_0$	42,34	14,019	0,180
Z	2,38	1,81	

Расширенная неопределенность:

$$U(Z) = 2 \cdot 1,81 = 3,63 \approx 3,7 \text{ г/м}^3$$

Результат измерения:

$$Z = (2,4 \pm 3,7) \text{ г/м}^3 \text{ при } P=0,95 \text{ и } k=2.$$

**Выводы**

Предложенный метод поэтапной оценки неопределенности измерений на примере оценки запыленности газопылевых потоков позволяет разложить сложную задачу на простые составляющие и последовательно провести оценку неопределенности.

**Список литературы**

1. Руководство по выражению неопределенности измерения, Санкт-Петербург, 1999.
2. РМГ 43-2001 Применение «Руководства по выражению неопределенности измерения»
3. Муқанов Д.М., Петров А.А., Вагина А.Л., Родионова С.В. Неопределенность результатов измерений (методическое пособие), Алматы, 2002.
4. M003 The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement, Edition 3, November 2012/

Поступила в редколлегию 4.04.2014

**Рецензент:** к-т хим. наук Бектурганова Г.К., РГП «Казахстанский институт метрологии», Астана, Республика Казахстан.

**ОЦІНКА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ЗАПИЛЕНІСТІ ГАЗОПИЛОВОГО ПОТОКУ ПРОМИСЛОВИХ ВИКИДІВ**

В.О. Донбаєва, Б.Т. Айткешева

Розглядається процедура поетапної оцінки невизначеності при визначенні запыленості газопилових потоків промислових викидів, проведена при визначенні запыленості газопилових потоків, що виходять з котельні, опалює адміністративну будівлю в м. Астана.

**Ключові слова:** невизначеність вимірювання, запыленість газопилових потоків, об'ємна швидкість газу.

**EVALUATION OF UNCERTAINTY IN DETERMINING THE DUST CONTENT OF GAS AND DUST FLOWS OF INDUSTRIAL EMISSIONS**

V.A. Donbayeva, B.T. Aitkesheva

The article considers the procedure of phased assessment of uncertainty in determining the dust content of gas and dust flows of industrial emissions, taken in determining the gas-dust streams emanating from the boiler station, heating the office building in Astana.

**Keywords:** uncertainty of measurement, dust gas and dust flow velocity, the gas volumetric flow rate.