



DOI: 10.25558/VOSTNII.2026.42.24.005

УДК 669.184.163

© С. А. Добротин, О. Н. Косырева, А. А. Попов, 2026

С. А. ДОБРОТИН

д-р техн. наук, проф.,
профессор кафедры

Дзержинский политехнический институт (филиал) Нижегородского
государственного политехнического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Дзержинск
e-mail: dobrotin59@mail.ru

О. Н. КОСЫРЕВА

ст. преподаватель кафедры

Дзержинский политехнический институт (филиал) Нижегородского
государственного политехнического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Дзержинск
e-mail: lelia7@list.ru

А. А. ПОПОВ

канд. техн. наук, доцент
доцент кафедры

Дзержинский политехнический институт (филиал) Нижегородского
государственного политехнического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Дзержинск
e-mail: popov@dpingtu.ru

ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ СРЕДНЕЙ СКОРОСТИ ГАЗОПЫЛЕВОГО ПОТОКА ОТ СТАЦИОНАРНОГО ИСТОЧНИКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Показана необходимость освоения компетенции расчета неопределенности результата измерения сотрудниками лабораторий. Описывается методика оценки неопределенности результата измерения средней скорости газопылевого потока с помощью напорных трубок от стационарного источника загрязнения. Полученное значение стандартной неопределенности (СН) необходимо для расчета неопределенности результата измерения запыленности (массового содержания взвешенных частиц) газопылевых потоков. Получена формула для расчета СН. Суммарная СН рассчитывается с использованием уравнения измерения, при этом учитывается коррелированность статического и динамического давлений газопылевого потока. На основании приведенных результатов измерений приведен пример расчета СН для случая газохода прямоугольного поперечного сечения с указанием конкретных средств измерений и их метрологических характеристик. Установлено, что основными факторами, определяющими неопределенность результата измерения, являются вариативность динамического давления газа и неисключенные систематические погрешности коэффициента преобразования напорной трубки и средства измерения давления газа. Приведен бюджет неопределенности результата измерения.

Ключевые слова: ИСТОЧНИК ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ, СКОРОСТЬ ГАЗОПЫЛЕВОГО ПОТОКА, НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ РЕЗУЛЬТАТА ИЗМЕРЕНИЯ, МЕТОДИКА РАСЧЕТА.

ВВЕДЕНИЕ

Результат измерения, проводимого аккредитованной лабораторией, должен сопровождаться указанием расширенной неопределенности измеряемой величины. В выдаваемых лабораториями протоколах измерений широко распространено указание характеристик погрешности, прописанных в методиках измерений (МИ). Однако эти числовые значения указываются для условий воспроизводимости, в то время как в конкретной лаборатории проведение измерений осуществляется в условиях повторяемости или промежуточной прецизионности. Поэтому допускается [1] указание значений показателей точности, установленных при реализации методик анализа в конкретной лаборатории, что подтверждает более высокую достигнутую точность результатов измерений. Кроме того, в некоторых документах, выпущенных достаточно давно, вообще не указываются достигаемые в МИ значения характеристик погрешности. Всё это диктует необходимость освоения компетенции расчета неопределенности результата измерения сотрудниками лабораторий. Требование овладения данной компетенцией также прописано в [2] и некоторых других документах, устанавливающих требования к компетентности испытательных лабораторий.

В статье описывается методика оценки неопределенности результата измерения средней скорости газопылевого потока от стационарного источника загрязнения, прописанной в [3]. Полученное значение стандартной неопределенности (СН) необходимо для расчета неопределенности результата измерения запыленности (массового содержания взвешенных частиц) газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения, методика измерения которой прописана в [4]. Для конкретизации предложенной методики приведен пример необходимых расчетов для случая газохода прямоугольного поперечного сечения.

ОПИСАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ПРОЦЕДУРЫ

Измерительное сечение должно располагаться на прямом участке L газохода (рис. 1), свободном от элементов, создающих местное сопротивление (задвижки, колена и т.п.). Значение длины прямого участка выбирается из условия:

$$L \geq 4D_e, \quad (1)$$

где D_e — эквивалентный диаметр поперечного сечения газохода.

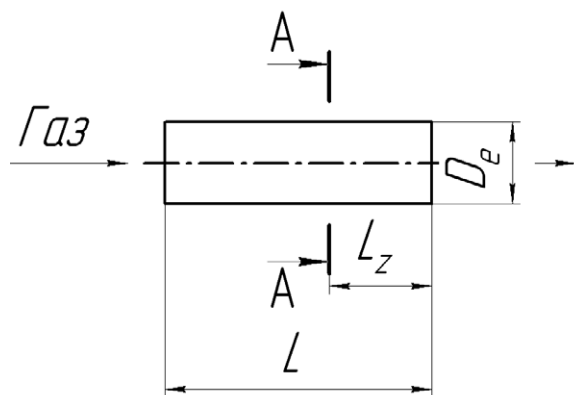


Рис. 1. Расположение измерительного сечения L — длина прямого участка газохода, кратная D_e ; $A - A$ — измерительное сечение; L_z — длина прямого участка газохода за измерительным сечением, кратная D_e

Для газохода прямоугольного сечения:

$$D_e = \frac{2A \cdot B}{A + B}, \quad (2)$$

где A и B — внутренние размеры сечения газохода (рис. 2).

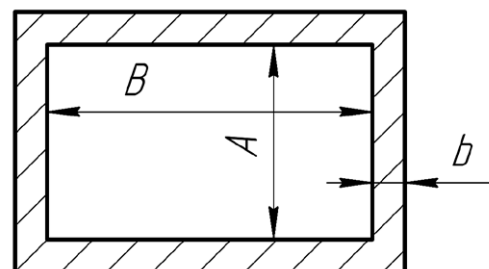


Рис. 2. Поперечное сечение газохода

Отношение длин отрезков до и после измерительного сечения принимается в соответствии с рис. 3.

Данный график описывается зависимостью

$$L_z = 0,375L - 0,5. \quad (3)$$

Количество точек измерения линейной скорости принимается в зависимости от полученных значений D_e и L/D_e по [3, табл. 1].

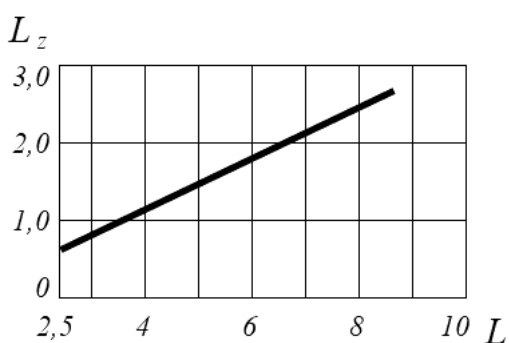


Рис. 3. График зависимости для выбора измерительного сечения

Скорость измеряют методом измерения динамического давления газа с помощью напорных трубок. При этом контрольную трубку устанавливают в фиксированной точке, а рабочую последовательно устанавливают в точках измерения. В каждой точке проводят не менее трех единичных определений динамического давления. Результатом измерения динамического давления P_d газа в отдельной точке является среднее значение единичных определений. Среднее значение линейной скорости газа находится осреднением полученных значений скоростей в измерительных точках. Для определения плотности газа в рабочих условиях этого проводятся измерения статического давления газа в газоходе, атмосферного давления и температуры газа в газоходе.

В соответствии с [3] точки измерения температуры должны располагаться на полосе по периметру от 1/6 до 1/3 линейного размера прямоугольного газохода в противоположных по отношению к оси газохода сторонах. Таким образом, для измерения температуры необходимо 6 точек в измерительном сечении.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ ЛИНЕЙНОЙ СКОРОСТИ ГАЗОВОГО ПОТОКА

Линейная скорость газа $v_i, \frac{м}{с}$, в i -ой измерительной точке измерительного сечения:

$$v_i = \sqrt{\frac{2 \cdot P_{d,i}}{\rho}}, \quad (4)$$

где $P_{d,i}$ — динамическое давление газа в i -ой измерительной точке, Па; ρ — плотность газа при рабочих условиях, кг/м³.

Плотность газа при рабочих условиях

$$\rho = 2,695 \cdot \rho_N \cdot \frac{P_a + P_{ст}}{273 + t}, \quad (5)$$

где ρ_N — плотность газа при нормальных условиях, кг/м³; P_a — атмосферное давление воздуха, кПа; $P_{ст}$ — статическое давление газа, кПа; t — температура газа в газоходе, °С.

Необходимо отметить, что поскольку расположение измерительных точек в поперечном сечении при измерении давления и температура газа не совпадает, то в формуле (5) необходимо использовать осредненные значения.

Коэффициент 2,695 получается как результат использования в формуле (5) отношения температуры T_N к давлению P_N при нормальных условиях:

$$T_N / P_N = 273 / 101,3 = 2,695 \frac{К}{кПа}. \quad (6)$$

Для воздуха плотность при нормальных условиях $\rho_N = 1,293 \frac{кг}{м^3}$ [5].

Обозначим

$$k = 2,695 \cdot \rho_N = 2,695 \cdot 1,293 = 3,485 \frac{К \cdot кг}{кПа \cdot м^3}. \quad (7)$$

Тогда линейная скорость газа $v_i, \frac{м}{с}$, в отдельной измерительной точке измерительного сечения

$$v_i = \sqrt{\frac{2 \cdot P_{d,i} \cdot T}{k \cdot (P_a + P_{ст,i})}}, \quad (8)$$

где T — абсолютная температура газа в газоходе, К.

Согласно [3, формулы (12), (13)] средняя скорость v в измерительном сечении

$$v = \alpha \sqrt{\frac{2P_{\text{дк}}}{\rho}}, \quad (9)$$

где α — коэффициент поля скоростей в измерительном сечении; $P_{\text{дк}}$ — динамическое давление в контрольной точке измерительного сечения, Па.

Коэффициент

$$\alpha = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{P_{\text{д},i}}{P_{\text{дк}}}}. \quad (10)$$

Однако если подставить выражение (10) в формулу (9), то получим

$$v = \sqrt{\frac{2P_{\text{дк}}}{\rho}} \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{P_{\text{д},i}}{P_{\text{дк}}}} = \frac{1}{n} \cdot \sqrt{\frac{2P_{\text{дк}}}{\rho}} \cdot \frac{1}{\sqrt{P_{\text{дк}}}} \cdot \sum_{i=1}^n \sqrt{P_{\text{д},i}} = \frac{1}{n} \cdot \sqrt{\frac{2P_{\text{д},i}}{\rho}} = \frac{1}{n} \cdot v_i \quad (11)$$

Таким образом, средняя скорость находится по правилу средней арифметической простой величины. Поэтому в применении коэффициента поля скоростей α при расчете средней скорости нет необходимости. Для расчёта средней скорости газа в измерительном сечении достаточно использовать средние значения величин, входящих в правую часть формулы (8). Таким образом, средняя линейная скорость газового потока определяется выражением:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot P_{\text{д}} \cdot T}{k \cdot (P_{\text{а}} + P_{\text{ст}})}}. \quad (12)$$

ОБЩИЙ ПОДХОД К РАСЧЕТУ РАСШИРЕННОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ РЕЗУЛЬТАТА ИЗМЕРЕНИЯ

Пусть результат измерения величины y получается с помощью уравнения измерения:

$$y = f(X), \quad (13)$$

где X — вектор входных величин.

В соответствии с концепцией неопределенности измерения [6, 7] в качестве количественной характеристики качества используется расширенная неопределенность

результата измерения величины y . Для ее нахождения вначале определяют стандартную неопределенность (СН), а затем переходят к расширенной неопределенности:

$$U(y) = k_o \cdot u(y), \quad (14)$$

где k_o — коэффициент охвата; $u(y)$ — СН результата измерения величины y .

В большинстве нормативных документов, касающихся расчета неопределенности, рекомендуется численное значение коэффициента охвата $k_o = 2$, что основано на центральной предельной теореме в теории вероятностей.

Компоненты x_i вектора входных величин X находятся, как правило, в результате прямых измерений и характеризуются стандартными неопределенностями $u(x_i)$.

Оценка СН входной величины x , проводимая путем статистической обработки результатов прямых измерений этой величины, называемая СН типа А, определяется по формуле:

$$u_A(x) = \sqrt{\frac{\sum_{u=1}^n (x_u - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}}, \quad (15)$$

где u — номер единичного определения; n — число единичных определений; \bar{x} — среднее значение.

При использовании сторонних источников информации для оценки СН последняя называется СН типа В. Как правило, для оценки СН типа В используется информация о доверительных границах неисключенной систематической погрешности (НСП) средства измерения (СИ), которая имеется в руководстве по эксплуатации или описании типа СИ. В предположении о равномерном законе распределения НСП СН типа В определяется следующим образом:

$$u_B(x) = \frac{\Delta x}{\sqrt{3}}, \quad (16)$$

где Δx_i — доверительные границы абсолютной НСП измерения величины x_i .

Суммарная СН результата измерения входной величины

$$u(x) = \sqrt{(u_A(x))^2 + (u_B(x))^2}. \quad (17)$$

При необходимости перехода к относительной форме СН, она рассчитывается по формуле:

$$\delta u(x) = \frac{u(x)}{x}. \quad (18)$$

Линеаризация уравнения (13) при выполнении условия пренебрежения остаточным членом формулы Тейлора [7] приводит к следующей формуле [8]:

См. формула №19 внизу страницы.

где $r(x_i, x_j)$ — коэффициент линейной парной корреляции компонентов x_i и x_j вектора X .

Данная формула упрощается для предельных значений коэффициента корреляции:

— для случая независимых случайных величин (коэффициент корреляции равен нулю)

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2} u^2(x_i), \quad (20)$$

— для случая линейной зависимости входных величин (все входные величины коррелированы с коэффициентами корреляции

$$|r(x_i, x_j)| = 1)$$

$$u(y) = \left| \sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \cdot u(x_i) \right|. \quad (21)$$

Коэффициент линейной парной корреляции $r(x_i, x_j)$ рассчитывается по выборке, поэтому предельные значения 0 или 1 никогда не получатся. В первом случае значения данного коэффициента, статистически неотличимые от 0, указаны в [9], во втором — в [10].

Если правая часть уравнения измерения (13) представляет собой отношение или произведение входных величин, то при переходе к стандартным неопределенностям в относительном виде формула (20) упрощается:

$$\delta u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m (\delta u(x_i))^2}, \quad (22)$$

где $\delta u(x_i)$ — относительная СН (ОСН) входной величины x_i .

РАСЧЕТ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ СРЕДНЕЙ ЛИНЕЙНОЙ СКОРОСТИ ГАЗОВОГО ПОТОКА

СН средней скорости будет определяться по формуле (19). Для этого необходимо

найти частные производные $\frac{\partial f}{\partial x_i}$. Уравнение измерения определено формулой (12). Вследствие наличия взаимосвязи между статическим $P_{ст}$ и динамическим давлением $P_{д}$ через полное давление $P_{п}$ газа в газоходе они коррелируют между собой. Все остальные величины в правой части формулы являются независимыми. Таким образом, количество слагаемых в правой части формулы (19) равняется пяти.

Обозначим входные переменные в формуле (19):

$$x_1 = P_{п}; x_2 = T; x_3 = P_a; x_4 = P_{ст}. \quad (23)$$

В целом подкоренное выражение в формуле (12) обозначим

$$\varphi = \frac{2 \cdot P_{д} \cdot T}{k \cdot (P_a + P_{ст})}. \quad (24)$$

Тогда первое слагаемое $u_1^2(v)$ дисперсии средней линейной скорости газового потока

$u^2(v)$:

$$u_1^2(v) = \left(\frac{\partial f}{\partial P_{п}} \right)^2 \cdot u^2(P_{п}) = \left(\frac{1}{2\sqrt{\varphi}} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial P_{п}} \right)^2 \cdot u^2(P_{п}) \quad (25)$$

Будем искать его в относительном виде:

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial f}{\partial x_j} \cdot u(x_i) \cdot u(x_j) \cdot r(x_i, x_j)}, \quad (19)$$

$$\begin{aligned}
 (\delta u_1(v))^2 &= \frac{u_1^2(v)}{v^2} = \frac{1}{4\varphi^2} \cdot \left(\frac{\partial \varphi}{\partial P_d} \right)^2 \cdot u^2(P_d) = \\
 &= \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{k \cdot (P_a + P_{ст})}{2 \cdot P_d \cdot T} \right)^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot T}{k \cdot (P_a + P_{ст})} \right)^2 \cdot u^2(P_d) = \\
 &= \frac{1}{4} \cdot \frac{u^2(P_d)}{P_d^2} = \frac{1}{4} \cdot \delta u^2(P_d)
 \end{aligned}$$

Таким образом,

$$(\delta u_1(v))^2 = \frac{1}{4} \cdot \delta u^2(P_d). \quad (26)$$

Находя аналогичным образом другие составляющие, получаем

$$(\delta u_2(v))^2 = \frac{1}{4} \cdot \delta u^2(T). \quad (27)$$

$$\begin{aligned}
 (\delta u_3(v))^2 &= \frac{u_3^2(v)}{v^2} = \frac{1}{4\varphi^2} \cdot \left(\frac{\partial \varphi}{\partial P_a} \right)^2 \cdot u^2(P_a) = \\
 &= \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{k \cdot (P_a + P_{ст})}{2 \cdot P_d \cdot T} \right)^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot P_d \cdot T}{k} \right)^2 \cdot \\
 &\cdot \frac{1}{(P_a + P_{ст})^4} \cdot u^2(P_a) = \frac{1}{4} \cdot \frac{u^2(P_a)}{(P_a + P_{ст})^2}
 \end{aligned} \quad (28)$$

$$(\delta u_4(v))^2 = \frac{1}{4} \cdot \frac{u^2(P_{ст})}{(P_a + P_{ст})^2} \quad (29)$$

Находим корреляционное слагаемое. Для этого сначала находим частные производные:

$$\frac{\partial f}{\partial P_d} = \frac{1}{2\sqrt{\varphi}} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial P_d} = \frac{1}{2\sqrt{\varphi}} \cdot \frac{2 \cdot T}{k \cdot (P_a + P_{ст})} \quad (30)$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial f}{\partial P_{ст}} &= \frac{1}{2\sqrt{\varphi}} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial P_{ст}} = \frac{1}{2\sqrt{\varphi}} \cdot \\
 &\cdot \frac{2 \cdot P_d \cdot T}{k} \cdot (-1) \cdot \frac{1}{(P_a + P_{ст})^2}
 \end{aligned} \quad (31)$$

Тогда корреляционное слагаемое:

$$\begin{aligned}
 (\delta u_5(v))^2 &= 2 \cdot \frac{1}{4\varphi^2} \cdot \frac{2 \cdot T}{k \cdot (P_a + P_{ст})} \cdot \frac{2 \cdot P_d \cdot T}{k} \cdot (-1) \cdot \frac{1}{(P_a + P_{ст})^2} \cdot u(P_d) \cdot u(P_{ст}) \times \\
 &\times r(P_d; P_{ст}) = -2 \cdot \left(\frac{k \cdot (P_a + P_{ст})}{2 \cdot P_d \cdot T} \right)^2 \cdot \frac{P_d \cdot T^2}{k^2 \cdot (P_a + P_{ст})^3} \cdot u(P_d) \cdot u(P_{ст}) \cdot r(P_d; P_{ст}) = \\
 &= -\frac{1}{2} \cdot \frac{u(P_d) \cdot u(P_{ст})}{P_d \cdot (P_a + P_{ст})} \cdot r(P_d; P_{ст}) = -\frac{1}{2} \cdot \delta u(P_d) \cdot \frac{u(P_{ст})}{P_a + P_{ст}} \cdot r(P_d; P_{ст})
 \end{aligned}$$

Таким образом,

$$(\delta u_5(v))^2 = -\frac{1}{2} \cdot \delta u(P_d) \cdot \frac{u(P_{ст})}{P_a + P_{ст}} \cdot r(P_d; P_{ст}) \quad (32)$$

В итоге получается следующая формула для расчета стандартной неопределенности линейной скорости газового потока:

$$\begin{aligned}
 \delta u(v) &= \left(\frac{1}{4} \cdot \delta u^2(P_d) + \frac{1}{4} \cdot \delta u^2(T) + \right. \\
 &+ \frac{1}{4} \cdot \frac{u^2(P_a)}{(P_a + P_{ст})^2} + \frac{1}{4} \cdot \frac{u^2(P_{ст})}{(P_a + P_{ст})^2} - \\
 &\left. - \frac{1}{2} \cdot \delta u(P_d) \cdot \frac{u(P_{ст})}{P_a + P_{ст}} \cdot r(P_d; P_{ст}) \right)^{1/2} \quad (33)
 \end{aligned}$$

Возможность ее дальнейшего упрощения будет определяться, исходя из численных значений полученных результатов измерений.

ПРИМЕР РАСЧЕТА ЛИНЕЙНОЙ СКОРОСТИ

Для возможности проведения практических расчетов принято, что при проведении измерений применялись нижеперечисленные средства измерений. Для измерения полного и динамического давления газа в газоходе использовалась напорная трубка модификации НИИОГАЗ и манометр дифференциальный цифровой ДМЦ-01О. Коэффициент преобразования рабочей напорной трубки $K_{тр, p} = 0,533$. Предел допускаемой относительной погрешности определения коэффициента преобразования трубки $\delta_{тр} = 5\%$ [11].

Предел основной допускаемой абсолютной погрешности измерений дифференциальным цифровым манометром ДМЦ-01О [12] в диапазоне $0 \dots 500$ Па составляет $\Delta_{осн}(P_{изм}) = 3$ Па. В диапазоне $501 \dots 10000$ Па

$$\Delta_{осн}(P_{изм}) = 1 + 0,005 \cdot P_{изм}, \text{ Па} \quad (34)$$

Предел допускаемой дополнительной абсолютной погрешности при отклонении температуры окружающего воздуха на каждые 5 °С от нормальной (20±5) °С:

$$\Delta_{\text{доп. на } 5 \text{ }^\circ\text{C}} (P_{\text{изм}}) = 1 + 0,001 \cdot P_{\text{изм}}, \text{ Па} \quad (35)$$

Измерения атмосферного давления проводились метеометром МЭС-200А. Предел допускаемой основной погрешности при измерении атмосферного давления 0,3 кПа [13].

Измерения температуры проводились термометром контактным цифровым ТК-5.06 ЗПГУ/ЗВЛ-500, абсолютная погрешность при измерении температуры 0,5 °С [14].

Результаты измерений давления газа представлены в табл. 1.

Измеренное атмосферное давление было постоянным, $P_a = 99,9$ кПа.

Результат измерений температуры в измерительном сечении показан в табл. 2.

Таблица 2

Результат измерений температуры в измерительном сечении

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	79,7	79,9	80,1	80,1	80,3	79,9
-----------------------------	------	------	------	------	------	------

Из диаграммы рассеяния (рис. 4) между полным и динамическим давлением в рабочей трубке видно, что точка 15 (табл. 1) является выбросом. Она была удалена и в дальнейших расчетах не участвовала.

Динамическое давление газа в газоходе

$$P_d = P_{d, \text{изм}} \cdot K_{\text{тр}}, \quad (36)$$

где $P_{d, \text{изм}}$ — измеренное дифманометром динамическое давление в напорной трубке; $K_{\text{тр}}$ — коэффициент преобразования напорной трубки.

Статическое давление газа в газоходе:

Таблица 1

Результаты измерения давления с помощью рабочей напорной трубки

№ точки измерения	Измеренное давление газа в напорной трубке, Па		Давление газа в газоходе, Па		
	Динамическое давление	Полное давление	Динамическое	Полное	Статическое
1	111	-2333	59,163	-2333	-2392,16
2	144	-2310	76,752	-2310	-2386,75
3	155	-2347	82,615	-2347	-2429,61
4	197	-2374	105,001	-2374	-2479,00
5	152	-2384	81,016	-2384	-2465,02
6	162	-2416	86,346	-2416	-2502,35
7	188	-2399	100,204	-2399	-2499,20
8	185	-2379	98,605	-2379	-2477,61
9	201	-2418	107,133	-2418	-2525,13
10	211	-2418	112,463	-2418	-2530,46
11	198	-2412	105,534	-2412	-2517,53
12	199	-2404	106,067	-2404	-2510,07
13	174	-2384	92,742	-2384	-2476,74
14	192	-2441	102,336	-2441	-2543,34
15	211	-2125	-	-	-
Среднее значение	176,4*	-2387*	94,00	-2387	-2481

* — с учетом удаления выброса

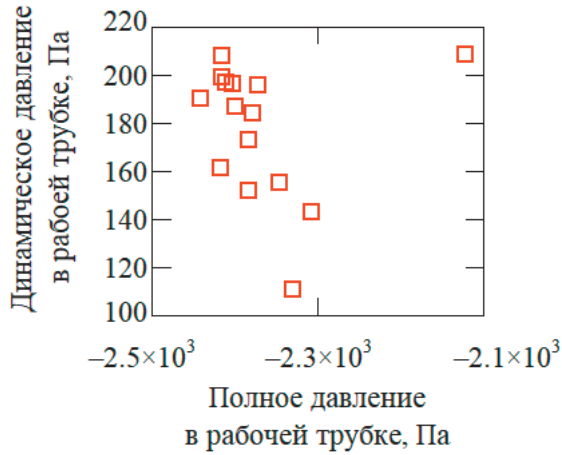


Рис. 4. Диаграмма рассеяния полного и динамического давления в рабочей трубке

$$P_{ст} = P_{п} \cdot K_{д}, \quad (37)$$

где $P_{п}$ — полное давление газа в газоходе.

Результаты измерения определения давления газа в газоходе показаны в табл. 1. Средние значения: полное давление $P_{п} = -2387$ Па, динамическое давление $P_{д} = 94,00$ Па, статическое давление $P_{ст} = -2481$ Па.

Среднее значение температуры $t = 80,0$ °С.

Средняя скорость газа в газоходе в соответствии с формулой (12):

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 94,00 \cdot (80,0 + 273)}{3,485 \cdot (99,9 - 2,481)}} = 13,98 \frac{м}{с}$$

Относительная СН определения динамического давления газа в измерительном сечении определяется двумя составляющими (типа А и В) и рассчитывается по формуле (17), которая в данном случае имеет вид:

$$\delta u(P_{д}) = \sqrt{(\delta u_A(P_{д}))^2 + (\delta u_B(P_{д}))^2}. \quad (38)$$

Составляющая типа А рассчитывается по формуле (15), динамическое давление газа в измерительном сечении $P_{д}$ — по формуле (40). Используя данные табл. 1, получаем

$$u_A = (P_{д}) = 4,00 \text{ Па}, \quad \delta u_A(P_{д}) = 4,26 \%$$

Относительная СН типа В

$$\delta u_B(P_{д}) = \sqrt{(\delta u_B(K_{тр}))^2 + (\delta u_B(P_{д,изм}))^2}, \quad (39)$$

где $\delta u_B(K_{тр})$ — относительная СН коэффициента преобразования напорной трубки;

$\delta u_B(P_{д,изм})$ — относительная СН динамического давления, измеряемого СИ.

Относительная СН коэффициента преобразования трубки:

$$\delta u_B(K_{тр}) = \frac{\delta(K_{тр})}{\sqrt{3}} = \frac{5}{\sqrt{3}} = 2,89\%$$

Предел основной допускаемой абсолютной погрешности измерений дифференциальным цифровым манометром ДМЦ-01О в диапазоне 0...500 Па составляет $\Delta_{осн}(P_{изм}) = 3$ Па. Предел допускаемой дополнительной абсолютной погрешности при отклонении температуры окружающего воздуха на каждые 5 °С от нормальной (20±5) °С

$$\Delta_{доп.на 5^\circ C}(P_{изм}) = 1 + 0,001 \cdot P_{изм} \text{ Па}$$

При проведении измерений температура составляла $t_{окр} = 8$ °С. Отклонение температуры от нормальных условий составляло:

$$\Delta t_{окр} = (20 \pm 5) - 8 = 12 \pm 5 = 7...17 \text{ °С.}$$

Принимаем ближайшее к середине интервала число, кратное 5. Тогда

$$\Delta t_{окр} = 15 \text{ °С}$$

Следовательно, дополнительная абсолютная погрешность:

$$\Delta_{доп.}(P_{изм}) = (1 + 0,001 \cdot P_{изм}) \cdot \frac{15}{5} = 3 + 0,003 \cdot P_{изм}, \text{ Па.}$$

Результирующая абсолютная НСП:

$$\Delta(P_{изм}) = \Delta_{осн}(P_{изм}) + \Delta_{доп.}(P_{изм}) \quad (40)$$

$$\Delta(P_{изм}) = 3 + 3 + 0,003 \cdot P_{изм} = 6 + 0,003 \cdot P_{изм}$$

Результирующая относительная НСП $\delta(P_{изм}), \%$

$$\delta(P_{изм}) = \left(\frac{6}{P_{изм}} + 0,003 \right) \cdot 100.$$

Относительная СН $\delta u_B(P_{изм}), \%$ результата измерения давления в рабочей трубке дифманометром:

$$\delta u_B(P_{изм}) = \frac{\delta(P_{изм})}{\sqrt{3}} = \left(\frac{6}{P_{изм}} + 0,003 \right) \cdot \frac{100}{\sqrt{3}}. \quad (41)$$

Среднее значение измеренного динамического давления в рабочей трубке:

$$P_{д, изм} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{д, изм, i}. \quad (42)$$

С учетом данных табл. 1:

$$P_{д, изм} = 176,4 \text{ Па}$$

Значение относительной СН результата измерения давления в рабочей трубке дифманометром

$$\delta u_B(P_{изм}) = \left(\frac{6}{176,4} + 0,003 \right) \cdot \frac{100}{\sqrt{3}} = 2,14\%.$$

Значение относительной СН типа В результата измерения динамического давления газа в измерительном сечении

$$\delta u_B(P_d) = \sqrt{2,89^2 + 2,14^2} = 3,60\%.$$

Соответствующая абсолютная СН

$$u_B(P_d) = 94,00 \cdot \frac{3,60}{100} = 3,4 \text{ Па}.$$

Суммарная стандартная неопределенность динамического давления газа

$$\delta u(P_d) = \sqrt{(4,26)^2 + (3,60)^2} = 5,58\%.$$

Диаграмма рассеяния статического и динамического давлений в газовом потоке, полученная по данным табл. 1, показана на рис. 5. Посчитанный коэффициент корреляции между этими величинами составил $r(P_d; P_{ст}) = -0,865$. При данном объеме выборки его можно считать статистически неотличимым от минуса единицы [10].

Тогда формула для оценки СН типа В статического давления газа в измерительном сечении с учетом формул (37) и (21) будет иметь вид:

$$u_B(P_{ст,г}) = |u_B(P_n) - u_B(P_d)|. \quad (43)$$

Посчитанное по данным табл. 1 (с учетом удаления выброса) среднее значение полного измеренного давления $P_n = -2387$ Па, предел основной допускаемой абсолютной погрешности измерений дифференциальным цифровым манометром ДМЦ-01О

$$\Delta_{осн}(P_n) = 1 + 0,005 \cdot 2387 = 12,9 \text{ Па}.$$

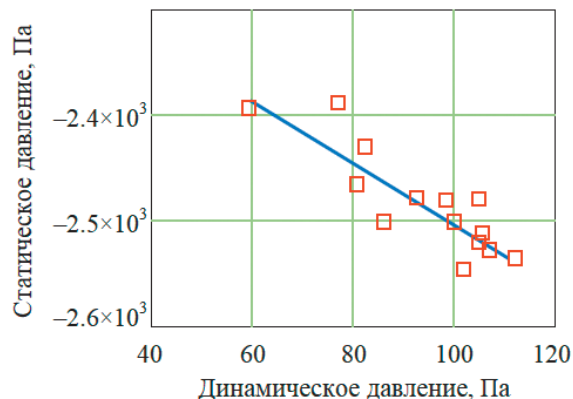


Рис. 5. Диаграмма рассеяния статического и динамического давлений газового потока

Дополнительная абсолютная погрешность

$$\Delta_{доп.}(P_n) = 3 + 0,003 \cdot 2387 = 8,2 \text{ Па}$$

Результирующая абсолютная НСП

$$\Delta(P_n) = 12,9 + 8,2 = 21,1 \text{ Па}$$

Результирующая относительная НСП

$$\delta(P_n) = \frac{21,1}{2387} \cdot 100 = 0,88\%.$$

Соответствующая СН

$$\delta u_B(P_n) = \frac{\delta(P_{н,изм})}{\sqrt{3}} = \frac{0,88}{\sqrt{3}} = 0,51\%.$$

Соответствующая абсолютная СН

$$u_B(P_{ст,г}) = 2387 \cdot \frac{0,51}{100} = 12,2 \text{ Па}.$$

Абсолютная СН типа В статического давления газа в измерительном сечении

$$u_B(P_{ст,г}) = 12,2 - 3,4 = 8,8 \text{ Па}.$$

Соответствующая относительная СН

$$\delta u_B(P_{ст,г}) = \frac{8,8}{2481} \cdot 100 = 0,35\%.$$

СН типа А статического давления газа будет определяться по формуле (15). С учетом данных табл. 1

$$u_A(P_{ст,г}) = 13,04 \text{ Па}; \quad \delta u_A(P_{ст,г}) = 0,53\%.$$

Суммарная относительная СН статического давления газа

$$\delta u(P_{ст,г}) = \sqrt{(0,53)^2 + (0,35)^2} = 0,64\%.$$

Суммарная абсолютная СН статического давления газа

$$u(P_{ст,г}) = \frac{0,64}{100} \cdot 2481 = 15,8 \text{ Па.}$$

Отношение

$$\frac{u(P_{ст,г})}{P_a + P_{ст,г}} \cdot 100 = \frac{0,0158}{99,9 - 2,481} \cdot 100 = 0,02\% .$$

Этим слагаемым в формуле (33) можно пренебречь.

СН результата измерения температуры газа.

$$u_B(T) = \frac{0,5}{\sqrt{3}} = 0,29 \text{ К.}$$

$$\delta u_B(T) = \frac{0,29}{80 + 273} \cdot 100 = 0,08\% .$$

По результатам измерений табл. 2 СН типа А

$$u_A(T) = 0,09 \text{ К}$$

Относительная СН

$$\delta u_A(T) = \frac{0,09}{80 + 273} \cdot 100 = 0,03\% .$$

Суммарная СН

$$u(T) = \sqrt{0,29^2 + 0,09^2} = 0,30 \text{ К.}$$

$$\delta u(T) = \frac{0,30}{80,0 + 273} \cdot 100 = 0,08\% .$$

При определении СН скорости газового потока вкладом от неопределенности измерения температуры можно пренебречь.

СН результата измерения атмосферного давления.

$$u_B(P_a) = \frac{0,3}{\sqrt{3}} = 0,17 \text{ кПа.}$$

Отношение:

$$\frac{u_B(P_a)}{P_a + P_{ст,г}} \cdot 100 = \frac{0,17}{99,9 - 2,481} \cdot 100 = 0,17\% .$$

По сравнению с составляющей, связанной с неопределенностью динамического давления, составляющей, связанной с неопределенностью атмосферного давления, можно пренебречь.

Значение СН, связанной с корреляционным слагаемым

$$\begin{aligned} \delta u_5(v) &= \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{5,58}{100} \cdot \frac{0,0158}{99,9 - 2,481}} \cdot 1 = \\ &= 2,13 \cdot 10^{-3} = 0,21\% \end{aligned}$$

Данным слагаемым также можно пренебречь.

Таким образом, с учетом полученных значений, формулу (33) можно представить в виде:

$$\delta u(v) = \frac{1}{2} \delta u(P_d) \quad (49)$$

$$\delta u(v) = \frac{1}{2} \cdot 5,58 = 2,79\%$$

Расширенная неопределенность измерения линейной скорости газового потока

$$\delta U(v) = 2 \cdot \delta u(v) = 5,58\% \quad (50)$$

$$\delta u(v) = \frac{1}{2} \cdot 5,58 = 2,79\%$$

Результат измерения линейной скорости газового потока

$$v = (14,0 \pm 0,8) \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Итоговый бюджет неопределенности результата измерения представлен в табл. 3.

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика расчета неопределенности средней линейной скорости газового потока, отходящего от стационарного источника загрязнения.

2. На практических исходных данных посчитаны стандартные и расширенные неопределенности средней линейной скорости. Относительная стандартная неопределенность составила 2,79 %. Расширенная неопределенность составляет 5,58 %. Результат измерения средней линейной скорости газа

$$v = (14,0 \pm 0,8) \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

3. Основными факторами, определяющими неопределенность результата измерения, являются вариативность динамического давления газа и неисключенные систематические погрешности коэффициента преобразования напорной трубки и средства измерения давления газа.

Бюджет неопределенности результата измерения средней линейной скорости

Порядковый номер входной величины	Величина, являющаяся источником неопределенности				Относительная стандартная неопределенность			Примечание
	Наименование	Условное обозначение	Единица измерения	Значение	Тип	Значение, %	Значение суммарной СН, %	
1	Динамическое давление газа	P_d	Па	94,0	-	-	5,58	-
1.1	Случайная вариативность	-	-	-	A	4,26	-	-
1.2	Коэффициент преобразования напорной трубки	$K_{тр}$	-	0,533	B	2,89	-	-
1.3	Средство измерения	-	-	-	B	2,14	-	-
2	Температура газа	T	°C (K)	80,0 (353)	-	-	0,08	Можно пренебречь
2.1	Случайная вариативность	-	-	-	A	0,03	-	-
2.2	Средство измерения	-	-	-	B	0,08	-	-
3	Атмосферное давление	P_a	Па	$99,9 \cdot 10^3$	B	-	0,17*	Можно пренебречь
4	Статическое давление газа	$P_{ст}$	Па		-	-	0,02**	Можно пренебречь
4.1	Случайная вариативность	-	-	-	A	0,53	-	-
4.2	Средство измерения	-	-	-	B	0,35	-	-
5	Коррелированность статического и динамического давления газа	-	-	-	-	-	0,21***	Можно пренебречь
Выходная величина	Средняя линейная скорость газового потока в измерительном сечении	v	м/с	14,0	-	-	2,79	-

* Определяется в виде слагаемого, соответствующего формуле (28).

** Определяется в виде слагаемого, соответствующего формуле (29).

*** Определяется в виде слагаемого, соответствующего формуле (32).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РМГ 61-2010. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Показатели точности, правильности, прецизионности методик количественного химического анализа. Методы оценки. [Электронный ресурс] // URL: <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&baseC=101&RegNum=53&DocOnPageCount=500&page=1&id=204311> (дата обращения 20.10.2025)
2. ГОСТ ISO/IEC 17025-2019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. [Электронный ресурс] // URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200166732> (дата обращения 20.10.2025).
3. ГОСТ 17.2.4.06-90. Охрана природы. Атмосфера. Методы определения скорости и расхода газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения. [Электронный ресурс] // URL: <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=137555> (дата обращения 20.10.2025).
4. ГОСТ 33007-2014. Оборудование газоочистное и пылеулавливающее. Методы определения запыленности газовых потоков. Общие технические требования и методы контроля. [Электронный ресурс] // URL: <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&baseC=6&page=10&month=5&year=2025&search=&RegNum=1&DocOnPageCount=15&id=200452> (дата обращения 20.10.2025).
5. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Л.: Химия, 1987. 576 с.
6. ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения. [Электронный ресурс] // URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200029975> (дата обращения 20.10.2025).
7. Попов А.А., Косырева О.Н., Добротин С.А. Оценка неопределенности результатов косвенных измерений по результатам системного анализа остаточного члена формулы Тейлора // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. № 2. С. 14–29.
8. ГОСТ 34100.1-2017/ISO/IEC Guide 98-1:2009 Неопределенность измерения. Часть 1. Введение в руководства по выражению неопределенности измерения. [Электронный ресурс] // URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200146870> (дата обращения 20.10.2025).
9. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1983. 416 с.
10. Добротин С.А., Косырева О.Н. Оценка значений выборочного коэффициента линейной парной корреляции, статистически неотличимых от единицы // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2025. №1. С. 12–23.
11. Описание типа средства измерений. Трубки напорные модификаций НИИОГАЗ и Пито. Регистрационный № 64221-16. [Электронный ресурс] // URL: <https://grmetr.ru/gosreestr/377885-64221-16-niiogaz-pito-i-pito-tsilindricheskaia> (дата обращения 20.10.2025).
12. Описание типа средства измерений. Манометры дифференциальные цифровые ДМЦ-01. Регистрационный № 15594-12. [Электронный ресурс] // URL: <https://grmetr.ru/gosreestr/313774-15594-12-dmts-01> (дата обращения 20.10.2025).
13. Описание типа средства измерений. Приборы контроля параметров воздушной среды «Метеометр МЭС-200А». Регистрационный № 27468-04. [Электронный ресурс] // URL: <https://grmetr.ru/media/pdf/2019-27468-04.pdf> (дата обращения 20.10.2025).
14. Описание типа средства измерений. Регистрационный № 41002-19. Термометры контактные цифровые ТК-5. [Электронный ресурс] // URL: <https://grmetr.ru/media/pdf/2022-41002-19.pdf> (дата обращения 20.10.2025).

DOI: 10.25558/VOSTNII.2026.42.24.005

UDC 669.184.163

© S. A. Dobrotin, O. N. Kosyreva, A. A. Popov, 2026

S.A. DOBROTIN

Doctor of Technical Sciences, Professor

Professor of the Department Dzerzhinsk Polytechnic Institute (branch) Nizhny Novgorod state technical University n. a. R.E. Alekseev

e-mail: dobrotin59@mail.ru

O.N. KOSYREVA

Assistant professor of the Department Dzerzhinsk Polytechnic Institute (branch) Nizhny Novgorod state technical University n. a. R.E. Alekseev

e-mail: lelia7@list.ru

A.A. POPOV

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Associate Professor of the Department Dzerzhinsk Polytechnic Institute (branch) Nizhny Novgorod state technical University n. a. R.E. Alekseev

e-mail: popov@dpingtu.ru

ASSESSMENT UNCERTAINTY MEASUREMENT AVERAGE SPEED GAS-DUST FLOW STATIONARY POLLUTION SOURCE

The necessity of mastering the competence in calculating measurement result uncertainty by laboratory personnel is demonstrated. A methodology is described for assessing the uncertainty of the measurement result of the average gas-dust flow velocity using Pitot tubes from a stationary pollution source. The obtained value of the standard uncertainty (SU) is necessary for calculating the uncertainty of the dustiness measurement result (mass concentration of suspended particles) in gas-dust flows. A formula for calculating the SU is derived. The total SU is calculated using the measurement equation, taking into account the correlation between static and dynamic pressures of the gas-dust flow. Based on the presented measurement results, an example of calculating the SU for a rectangular cross-section duct is given, specifying particular measuring instruments and their metrological characteristics. It is established that the main factors determining the measurement result uncertainty are the variability of the dynamic gas pressure and unexcluded systematic errors of the Pitot tube conversion coefficient and the gas pressure measuring device. An uncertainty budget for the measurement result is provided.

Keywords: ATMOSPHERIC POLLUTION SOURCE, GAS-DUST FLOW VELOCITY, MEASUREMENT RESULT UNCERTAINTY, CALCULATION METHODOLOGY.

REFERENCES

1. RMG 61-2010. State system for ensuring of measurements. Accuracy, trueness and precision of the procedures for quantitative chemical analysis. Methods of determination Moscow: Standartinform Publ., 2013. 63 p. [In Russ].
2. GOST ISO/IEC 17025-2019. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. Moscow: Standartinform Publ., 2019. 26 p. [In Russ].
3. GOST 17.2.4.06-90. Nature protection. Atmosphere. Methods for determination of velocity and flowrate of gas-and-dust streams from stationary sources of pollution. IPK Publishing House of Standards, 1991. 20 p. [In Russ].

4. GOST 33007-2014. Scrubber and duster equipment. Methods for determination of dust load of gas streams. General technical requirements and control methods. Moscow: Standartinform Publ., 2015. 23 p. [In Russ].
5. Pavlov K.F., Romankov P.G., Noskov A.A. Examples and tasks for the course on processes and apparatus of chemical technology. L.: Chemistry, 1987. 576 p. [In Russ].
6. GOST R ISO 5725-1-2002. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Part 1. General principles and definitions/ Moscow: Standartinform Publ., 2002. 24 p. [In Russ].
7. Popov A.A., Kosyreva O.N., Dobrotin S.A. Estimation of indirect observation uncertainty according to Tylor remainder system analysis // Proceedings of R.E. Alekseev NSTU. 2023. No. 2. P. 14–29. [In Russ].
8. GOST 34100.1-2017/ISO/IEC Guide 98-1:2009 Uncertainty of measurement. Part 1. Introduction to guides on the expression of uncertainty in measurement. Moscow: Standartinform Publ., 2018. 2p. [In Russ].
9. Bolshev, L.N., Smirnov N.V. Tables of Mathematical Statistics. Moscow: Nauka, 1983. 416 p. [In Russ].
10. Dobrotin S.A., Kosyreva O.N. Estimation of the values of the sample coefficient of linear pair correlation, statistically indistinguishable from unity // VSU Bulletin. Series: Systems Analysis and Information Technology. 2025. No. 1. P. 12–23. [In Russ].
11. Description of the measuring instrument type. Pressure tubes of the NIIOGAZ and Pitot modifications. Registration No. 64221-16 // URL: <https://grmetr.ru/gosreestr/377885-64221-16-niiogaz-pito-i-pito-tsilindricheskaia> (date of access 20.10.2025) [In Russ].
12. Description of the measuring instrument type. Differential digital pressure gauges DMC-01. Registration No. 15594-12 // URL: <https://grmetr.ru/gosreestr/313774-15594-12-dmts-01> (date of access 20.10.2025) [In Russ].
13. Description of the measuring instrument type. Air quality monitoring device «MES-200A Meteometer». Registration No. 27468-04. // URL: <https://grmetr.ru/media/pdf/2019-27468-04.pdf> (date of access 20.10.2025) [In Russ].
14. Description of the measuring instrument type. Registration No. 41002-19. TK-5 digital contact thermometers // URL: <https://grmetr.ru/media/pdf/2022-41002-19.pdf> (date of access 20.10.2025) [In Russ].