

Новый метод градуировки сопел для расходомерных газовых установок

М. Б. ГУТКИН, Ю. А. ЧИСТЯКОВ

Всероссийский научно-исследовательский институт им. Д. И. Менделеева, С.-Петербург, Россия, e-mail: Yu.A.Chistyakov@vniim.ru

Предложен новый метод градуировки сопел для расходомерных газовых установок. Выполнены экспериментальные исследования метода на установке с соплом Витошинского. Показано, что значения расширенной неопределенности при измерениях коэффициента расхода сопла не превышают $\pm 0,1\%$, т. е. в два раза меньше чем у рабочих эталонов 1-го разряда.

Ключевые слова: расход газа, сопло Витошинского.

The new method of nozzles calibration for flow metering gas installations is proposed. The experimental studies on the installation with Vitoshinsky nozzle and calculation of uncertainty budget at nozzle flow rate factor measurements are carried out. It is shown that expanded uncertainty values do not exceed $\pm 0,1\%$, what is twice less than for first category working standards.

Key words: gasflow rate, Vitoshinsky nozzle.

К середине 80-х годов прошлого века во ВНИИМ были созданы два государственных первичных эталона (ГПЭ) единиц скорости водного и воздушного потока, соответственно ГЭТ 137—83 и ГЭТ 150—85. Особенность этих эталонов состоит в том, что они кроме воспроизведения единиц скорости обеспечивают измерение расхода методом площадь — скорость и при помощи специальных сужающих устройств (СУ). Эти СУ выполнены на основе уравнения для образующей тела вращения, предложенного С. Витошинским в начале 20-го века [1]. Его работы касались аэродинамики летательных аппаратов и СУ должно было сформировать на выходе поток с наименьшим пограничным слоем. Сопла (сужающие устройства) на основе уравнения Витошинского исследовали во ВНИИМ с начала 1970 г. и на их базе были спроектированы и созданы эталонные сопла для указанных выше эталонов.

Метод измерений расхода и объема различных сред (жидкостей и газов) с использованием СУ известен давно и хорошо изучен. В настоящее время применяются диафрагмы и сопла (трубы) Вентури [2]. Метод переменного перепада давления основан на уравнении Бернулли для безотрывного течения среды. В случае измерения скорости v среды, протекающей через СУ, это уравнение принимает вид

$$v = K \sqrt{2\Delta p / \rho}, \quad (1)$$

где K — коэффициент преобразования СУ; Δp — перепад давлений; ρ — плотность среды.

Для измерения расхода Q формула (1) преобразуется:

$$Q = KS \sqrt{2\Delta p / \rho},$$

где K — коэффициент расхода СУ, S — площадь его выходного сечения.

Существующие теоретические методы расчета коэффициента расхода, как правило, не обеспечивают достаточную для практики точность. Поэтому значения коэффициентов истечения, стандартизованные в отечественных и зарубежных нормативных документах, являются результатом обработки многочисленных высокоточных экспериментальных исследований. Однако погрешность определения коэффициента расхода, вносящая существенный вклад в результат измерений, в соответствии с [2] оказывается не менее 0,5 %, что не позволяет использовать такие СУ в эталонных поверочных установках.

В эталонах, разработанных во ВНИИМ для формирования потока с плоской эпюрой скорости на выходе СУ, применяются модернизированные сопла, профиль которых рассчитан по уравнению Витошинского. Многолетние исследования полей скорости на выходе таких СУ позволили подобрать оптимальные соотношения между площадями входных и выходных сечений, а также длину сопел.

Особенность использования таких СУ в качестве первичного преобразователя (совместно с высокоточным измерителем разности давлений) эталонных измерительных систем объема и расхода газа связана с высокой точностью определения коэффициента расхода на жидкой среде (вода). В гидроаэродинамике в качестве критерия подобия при распространении результатов экспериментов, полученных при одном состоянии среды на другое, применяется число Рейнольдса

$$Re = \nu \rho D / \mu,$$

где D — диаметр трубопровода; μ — динамическая вязкость измеряемой среды.

Применительно к расходу измеряемой среды

$$Re = 1,273 Q_m / (\mu D),$$

где Q_m — массовый расход измеряемой среды.

Источник неопределенности	u_A	u_B	Значение, %	Погрешность, %	Весовой коэффициент
Измерение дифференциального давления	+	–	0,05	–	–
То же	–	+	0,05773503	0,1	$4,27 \cdot 10^{-5}$
Измерение времени	–	+	0,0057735	0,01	$5,38 \cdot 10^{-5}$
Измерение плотности	–	+	0,0057735	0,01	$8,54 \cdot 10^{-5}$
Неопределенность эталона	–	+	0,03	–	$3,59 \cdot 10^{-4}$
Измерение диаметра	–	+	0,00173205	0,003	10,76081
Суммарная неопределенность, u_c	–	–	0,05336091	–	–
Расширенная неопределенность, коэффициент охвата $k=2$	–	–	0,11	–	–

Используя число Re , можно рассчитать диапазон расходов жидкости, при котором результаты градуировки сопла будут эквивалентны результатам, полученным при его использовании для измерения объема и расхода газа, при этом должно соблюдаться условие $Re > Re_{кр}$, где $Re_{кр}$ соответствует значению Re , выше которого коэффициент расхода СУ остается постоянным.

Например, для расхода жидкости (вода), протекающей по трубопроводу с внутренним диаметром 0,1 м и массовым расходом 15 кг/с ($54 \text{ м}^3/\text{ч}$), получаем $Re = 189059,4$, при котором расход воздуха будет $0,226 \text{ м}^3/\text{с}$ ($815 \text{ м}^3/\text{ч}$).

Во ВНИИМ находится рабочий эталон [3] единиц объема и массы жидкости, протекающей по трубопроводу, обеспечивающий измерения объема и массы жидкости в диапазоне расхода $0,012 — 320 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($12 — 320\,000 \text{ кг/ч}$) с подтвержденной в международных сличениях (АРМР.М.ФФ-К1) расширенной неопределенностью 0,09 %. После применения корректирующих мероприятий ее удалось уменьшить до 0,03 %.

Уравнение измерений при градуировке эталонного сопла имеет вид

$$K = 4M_{гр} / (\pi D^2 \sqrt{2\rho\Delta p}),$$

где $M_{гр}$ — масса жидкости, прошедшей через градуируемое сопло за время эксперимента, по показаниям рабочего эталона; t — время наполнения весового бака рабочего эталона.

В таблице приведены результаты анализа бюджета неопределенностей [4] при измерениях коэффициента расхода сопла.

Из анализа приведенных данных можно сделать вывод, что значение расширенной неопределенности не превышает $\pm 0,1\%$, т. е. в два раза меньше, чем у рабочих эталонов 1-го разряда в соответствии с [5]. Более того, целесообразно было бы объединить поверочные схемы [3, 5], так как в основе этих видов измерений лежит килограмм.

Л и т е р а т у р а

1. **Виноградов Л. В., Лотфулин Ш. Р.** Исследование геометрических параметров сопла с контуром Витошинского // Вестник РУДН. Инженерные исследования. 2004. № 2. С. 44—49.
2. **ГОСТ 8.586 (1—5)—2005.** ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств.
3. **ГОСТ 8.510—2002.** ГСИ. Государственная поверочная схема: топливораздаточные и маслораздаточные колонки, счетчики холодной и горячей воды, камерные счетчики.
4. **РМГ 43—2001.** ГСИ. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений»
5. **ГОСТ 8.618—2006.** ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений объемного и массового расходов газа.

Дата принятия 10.01.2013 г.