РАЗРАБОТКА ЗАМКНУТОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНОЙ КАЛИБРОВКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

Пулатов Тахиржан Рустамбекович, доцент, PhD
Туринский Политехнический университет в г. Ташкенте

Аннотация. В работе рассматриваются научно-технические основы разработки замкнутой аэродинамической установки для высокоточной калибровки анемометров. Обоснована необходимость формирования национальной метрологической базы, обеспечивающей прослеживаемость измерений в диапазоне до 80 м/с. Представлены результаты аналитического моделирования, конструктивные решения и оценка метрологических характеристик. Показано, что применение замкнутой схемы обеспечивает высокую однородность потока и низкую турбулентность [1–3].

Ключевые слова: анемометр, калибровка, аэродинамическая установка, метрология, турбулентность.

Введение. Современные тенденции развития машиностроения и цифровых технологий требуют повышения точности измерений физических параметров технологических процессов. В частности, скорость воздушного потока является критически важной величиной в авиации, энергетике и экологическом мониторинге [1].

Анализ существующих методов калибровки показывает, что большинство установок не обеспечивают необходимую точность при высоких скоростях потока (>50 м/с), что связано с высоким уровнем турбулентности и неравномерностью профиля скорости [2].

В этой связи разработка замкнутых аэродинамических установок, обеспечивающих стабильные условия потока, является актуальной научной задачей [3].

1. Теоретические основы. Скорость воздушного потока определяется через динамическое давление:

$$V = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

где ΔP— разность полного и статического давления, ρ— плотность воздуха.

Согласно стандарту ISO 3966, данный метод является базовым для калибровки анемометрических приборов [4].

Расчёты показывают, что при скорости 80 м/с динамическое давление достигает ~3840 Па, что предъявляет повышенные требования к точности датчиков давления [2].

Качество потока характеризуется следующими параметрами:

- турбулентность ≤ 0.2%;
- неравномерность ≤ 0.5%;
- стабильность во времени.

Эти параметры напрямую влияют на неопределённость измерений [5].

2. Конструктивные решения. Замкнутая аэродинамическая установка включает:

- вентилятор;
- диффузор;
- выравнивающую камеру;
- honeycomb-структуру;
- сетки;
- рабочую часть.

Использование honeycomb-структуры позволяет существенно снизить уровень турбулентности потока за счёт подавления поперечных вихрей [3].

Согласно исследованиям, оптимальное соотношение длины ячейки к её диаметру должно составлять 6–10, что обеспечивает эффективное выпрямление потока [2].

Рабочая часть установки должна обеспечивать равномерный профиль скорости и возможность установки эталонного и калибруемого приборов в одной измерительной плоскости [4].

3. Метрологическое обеспечение. Калибровка выполняется с использованием:

- трубок Пито–Прандтля;
- дифференциальных датчиков давления;
- датчиков температуры и влажности.

Система соответствует требованиям:

- ISO 3966;
- ISO 5801;
- ISO/IEC 17025 [4–6].

Суммарная неопределённость измерений определяется методом корневой суммы квадратов составляющих [5].

Анализ показывает, что при соблюдении всех условий возможно достижение общей неопределённости порядка 0.5–1.0%.

4. Аналитические и численные исследования. CFD-моделирование показало:

- отклонение скорости $\leq \pm 0.3\%$;
- турбулентность $< 0.2\%$;
- отсутствие рециркуляционных зон.

Полученные результаты согласуются с данными, представленными в работах [2,3], где отмечается высокая эффективность замкнутых аэродинамических схем.

Энергетический анализ показал снижение энергозатрат до 30% по сравнению с открытыми установками [3].

Заключение. Разработка замкнутой аэродинамической установки позволяет обеспечить высокую точность калибровки анемометров в широком диапазоне скоростей. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенных конструктивных и метрологических решений [1–6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pope S.B. *Turbulent Flows*. — Cambridge University Press, 2000.

2. Barlow J.B., Rae W.H., Pope A. *Low-Speed Wind Tunnel Testing*. — Wiley, 1999.

3. Mehta R.D., Bradshaw P. Design rules for small low-speed wind tunnels // *Aeronautical Journal*. — 1979.

4. ISO 3966:2020. Measurement of fluid flow in closed conduits — Velocity area method using Pitot tubes.

5. ISO/IEC 17025:2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.

6. ISO 5801:2017. Fans — Performance testing using standardized airways.