



УДК 533.601.13

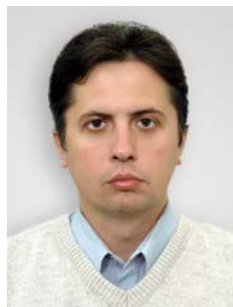
МЕТОДОЛОГИЯ ВЫСОКОТОЧНОГО ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ ЕДИНИЦЫ СКОРОСТИ НИЗКОСКОРОСТНЫХ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ

В.Б. Большаков, доктор технических наук, заслуженный деятель науки и техники Украины, главный научный сотрудник ННЦ "Институт метрологии", г. Харьков

Е.И. Олейник, научный сотрудник ННЦ "Институт метрологии", г. Харьков



В.Б. Большаков



Е.И. Олейник

Разработана методология воспроизведения и передачи единицы скорости низкоскоростных воздушных потоков, осуществлен выбор формы и приведены результаты исследований степени возмущения воздушной среды обтекателем государственного эталона единицы скорости воздушного потока.

Methodology of high precision reproduction and transfer of speed unit of low-speed airflow is developed; the form of research is selected, and the research results are given for air distortion with the cowl of the national air speed measurement standard.

Ранее авторами настоящей статьи было показано, что создание национальной системы обеспечения единства измерений скорости воздушного потока остается весьма актуальным. При этом, исходя из реалий Украины, наиболее важным на сегодняшний день является обеспечение высокоточных измерений низкоскоростных ($0,1 \text{ м/с} \leq V \leq 1,0 \text{ м/с}$) воздушных потоков, в частности, в системах конвективной вентиляции в шахтах, опасных по метану, каких только в Донбассе насчитывается около 87 %, и при экологическом мониторинге воздушной среды в окрестности тепловых и атомных электростанций [1].

Вместе с тем установлено, что высокоточное воспроизведение и передача единицы скорости низкоскоростных воздушных потоков средствами измерительной техники (СИТ) традиционным способом – посредством аэродинамической трубы (ТА) и соответствующих эталонных СИТ – весьма проб-

лематичны из-за перемежающегося режима движения воздушного потока в ТА и обусловленной этим недетерминированности его эпюры скоростей [1].

Показано, что без особых ухищрений высокоточное воспроизведение и передача единицы скорости низкоскоростных воздушных потоков обеспечиваются с помощью размещения СИТ, которому передается единица скорости воздушного потока, на движущейся с заданной скоростью в квазистационарной воздушной среде каретке, реализующей вытекающий из известной аксиомы Эйлера принцип инверсности: динамические эффекты вблизи любого тела, обтекаемого однородным потоком среды, и при движении тела в этой среде идентичны [1, 2].

Этот принцип реализован в государственном первичном эталоне единицы скорости воздушного потока в диапазоне от 0,1 до 1,0 м/с (ДЕТУ 02-06-11), созданном в ННЦ "Институт метрологии" в 2010 г. В нем пространственно-временное динамическое формирование воздушного потока обеспечивается инверсной динамической установкой посредством обтекаемой каретки, движущейся со стабильной в необходимом диапазоне и измеряемой с требуемой точностью постоянной скоростью. При этом делается предположение о том, что скорость естественного воздушного потока, набегающего на каретку, в "точке" размещения чувствительного элемента СИТ на некотором удалении от нее эквивалентна скорости воздушного потока в этой точке, обусловленной движением каретки относительно покоящейся воздушной среды [1].

Очевидно, что данное предположение, вытекающее из аксиомы Эйлера, в рассматриваемом приложении является весьма принципиальным и может быть состоятельным только в том случае, если каретка будет помещена в хорошо обтекаемый, мало возмущающий воздушную среду обтекатель, а точка размещения СИТ будет удалена от каретки на достаточное расстояние. Причем, это расстояние крайне желательно сократить до приемлемого минимума, исходя из вибрационных качеств устанавливаемой на каретке консоли, с помощью

которой чувствительный элемент СИТ размещается в точке воздушного потока с нормированными метрологическими характеристиками.

Задачей настоящих исследований и является выбор оптимальных обводов обтекателя каретки и расположения точки размещения СИТ.

При выборе формы обтекателя каретки необходимо выполнить условия, при которых возмущения квазистационарной воздушной среды в точке размещения СИТ, обусловленные движением каретки в обтекателе (что, согласно аксиоме Эйлера, идентично возмущению однородного потока кареткой в обтекателе), будут приемлемыми, исходя из нормированной неопределенности (погрешности) измерений скорости воздушного потока эталоном.

Как отмечалось ранее, в качестве обтекателя следует выбирать хорошо обтекаемые тела – тела с хорошими аэродинамическими качествами. К ним относятся, прежде всего, тела с круговой симметрией и малым сопротивлением при их движении в воздушном потоке, а именно: тела в виде эллипсоида вращения, тела каплеобразной формы, тела в виде кругового конуса с затупленной (сферической или параболической) лобовой частью и т.д. [3, 4].

Обтекание таких тел однородным воздушным потоком V ($V=V_x=V_\infty=\text{const}$, где V_∞ – скорость набегающего воздушного потока на достаточном удалении от обтекаемого тела) в плоскости симметрии тела – плоскости, в которой располагается точка М с СИТ, – схематически представлено на рис 1.

При этом скорость воздушного потока $V=(V_r, V_\Theta)$ в окрестности обтекаемого тела (рис. 1) определяется следующим образом [2]:

$$V_r = -V_\infty \left(\frac{\lambda^2 - 1}{\lambda^2 - \mu^2} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{0,5Ln \frac{\lambda + 1}{\lambda - 1} - \frac{\lambda}{\lambda^2 - 1} - 1}{0,5Ln \frac{1 + e}{1 - e} - \frac{e}{1 - e^2}} \right] \cdot \mu; \quad (1)$$

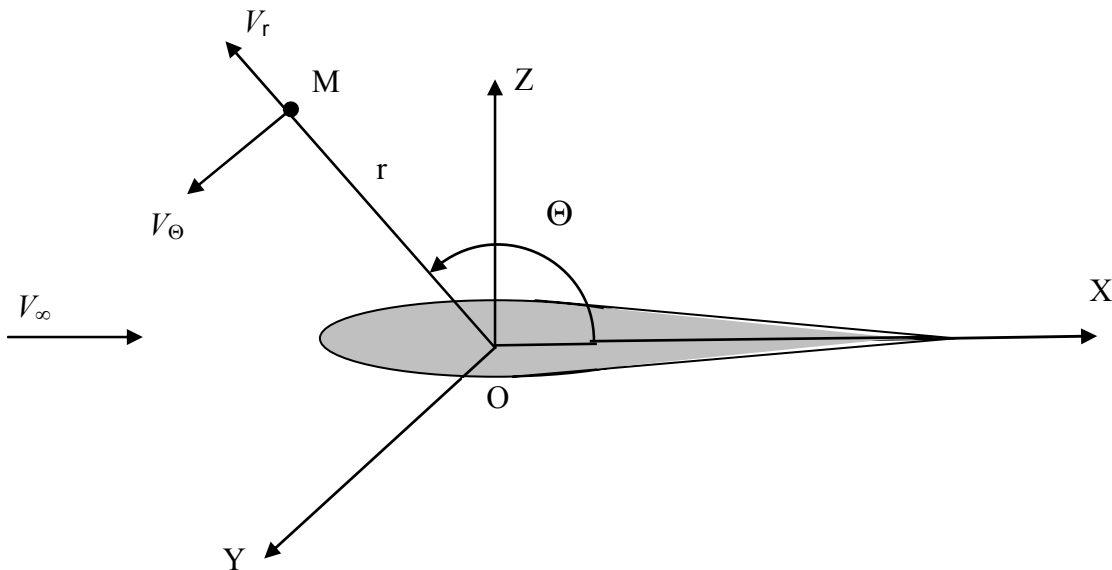


Рис. 1

$$V_\Theta = -V_\infty \left(\frac{1 - \mu^2}{\lambda^2 - \mu^2} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{0,5Ln \frac{\lambda + 1}{\lambda - 1} - 1}{0,5Ln \frac{1 + e}{1 - e} - \frac{e}{1 - e^2}} - \lambda \right], \quad (2)$$

где $e = \sqrt{a^2 - b^2}/a = c/a$ – эксцентриситет; $\mu = \cos \Theta$; $\lambda = r/c$ – эквивалентное расстояние точки М от центра обтекателя; r и Θ – естественные сферические координаты; a и b – малая и большая полуоси обтекаемого тела соответственно.

Относительная погрешность воспроизведения скорости воздушного потока данным методом равна

$$\delta V = \frac{V_\infty - V_{\text{мк}}}{V_\infty}, \quad (3)$$

где $V_{\text{мк}} = V_r \cos \Theta - V_\Theta \sin \Theta$ – воспроизводимая эталонном скорость воздушного потока (ее проекция на траекторию движения каретки).

В частности, при обтекании тела наиболее конструктивной сферической формы ($a=b$) выражения (1), (2) для эпюры скоростей и (3) для относительной погрешности воспроизведения скорости воздушного потока, обусловленной наличием в нем каретки в сферическом обтекателе, при числах Рейнольдса (Re), соответствующих воспроизводимому эталонном диапазону скоростей, принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} V_r &= V_\infty \left(1 - \left(\frac{a}{r} \right)^3 \right) \cos \Theta; \\ V_\Theta &= -V_\infty \left(1 + 0,5 \left(\frac{a}{r} \right)^3 \right) \sin \Theta; \\ \delta V &= \left(\frac{a}{r} \right)^3 (1 - 1,5 \sin^2 \Theta). \end{aligned} \quad (4)$$

Из условия минимизации δV как функции угла Θ , то есть $(\delta V)_\Theta = 0$, следует, что экстремальными точками δV являются: $\Theta = 0$; $\Theta = \pi$; $\Theta = \pi/2$; $\Theta = 3\pi/2$.

Несложно показать, что:

- в первых двух точках ($\Theta=0$; $\Theta=\pi$) – в лобовой и тыльной точках сферического обтекателя – функция δV имеет максимум, то есть в этих точках набегающий воздушный поток претерпевает максимальное возмущение;

- в остальных двух точках ($\Theta=\pi/2$; $\Theta=3\pi/2$) δV имеет минимум, то есть в этих точках набегающий воздушный поток претерпевает значительно меньшее (практически в 2 раза) возмущение;

- наряду с этими точками в набегающем потоке есть особые точки, в которых рассматриваемое возмущение потока отсутствует полностью, то есть $\delta V=0$.

Координаты этих точек $\Theta=55^{\circ}44'$ и $\Theta=125^{\circ}16'$. Однако первая находится за миделевым сечением $x=0$ (рис. 1) сферического обтекателя в возможной при некоторых числах Re зоне отрыва потока как от тела обтекания, так и с консоли и, в этой связи, не представляет практического интереса.

Оптимальными, с точки зрения минимальности возмущения потока сферическим обтекателем, являются точки с координатами $\Theta=125^{\circ}16'$. Однако анализ выражения δV (4), как функции расстояния r/a от обтекателя, показал, что приемлемое ($\delta V \approx 0,1\%$) возмущение воздушного потока обтекателем имеет место при $r/a \geq 8$, что при реальных размерах обтекателя каретки $a \approx 0,5$ м составляет примерно 4 м. В этой связи очевидно, что сферическая конфигурация обтекателя каретки инверсной аэродинамической установки эталона является далеко не конструктивной.

Лучшими аэродинамическими качествами обладают хорошо обтекаемые тела с $a > b$ (рис. 1) [3, 4]. Подставив выражения (1) и (2) для компонен-

тов эпюры скоростей в соотношение (3), получим значения относительной погрешности воспроизведения скорости воздушного потока δV , вызываемые кареткой в таком обтекателе.

Полученное выражение, как функция параметров λ и Θ , рассчитывалось на ПЭВМ. Результаты выполненных расчетов зависимости погрешности δV от эквивалентного расстояния λ при различных значениях угла Θ представлены на рис. 2, где δV_1 соответствует $\Theta \approx 125^{\circ}$, $\delta V_2 - \Theta \approx 120^{\circ}$, $\delta V_3 - \Theta \approx 118^{\circ}$, $\delta V_4 - \Theta \approx 115^{\circ}$, $\delta V_5 - \Theta \approx 100^{\circ}$, $\delta V_6 - \Theta \approx 90^{\circ}$.

Из выполненных расчетов и рис. 2 следует, что при δV_1 , что соответствует значению $\Theta \approx 125^{\circ}$, приемлемая ($\delta V \approx 0,1\%$) погрешность воспроизведения скорости воздушного потока кареткой в рассматриваемом обтекателе обеспечивается уже при $\lambda \approx 1$, то есть в точке М (рис. 1), удаленной от обтекателя на расстояние $r \approx a \approx 0,5$ м.

В работе [3] приведены результаты экспериментальных исследований моделей хорошо обтекаемых тел, формы которых близки к форме удлиненного эллипсоида вращения или дирижабля. Результаты экспериментальных исследований на моделях тел, которые соответствуют рассмотренным (рис. 1), подтверждают выполненные теоретические исследования и проведенные расчеты.

Анализ выполненных исследований показал, что наиболее оптимальными характеристиками обтекания обладает вытянутый эллипсоид с профилем NACA 64015 [4]. Его обтекание воздушным потоком представлено на рис. 3. Здесь линии тока визуализировались с помощью введенной в воздушный поток алюминиевой пудры. Результаты анализа такого обтекателя позволяют сделать вы-

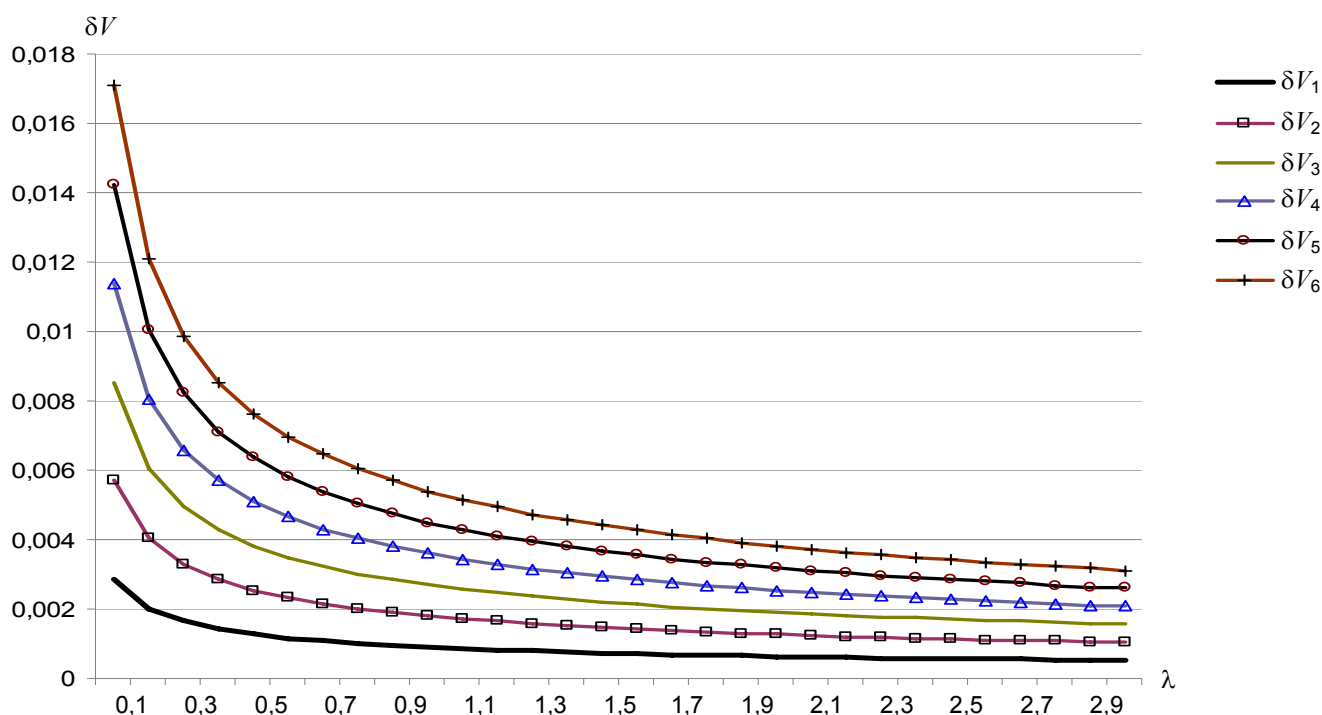


Рис. 2

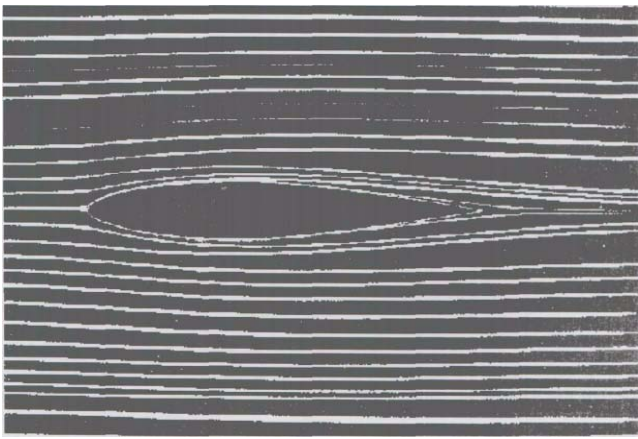


Рис. 3

вод о том, что в случае его использования в качестве обтекателя каретки невозмущенный воздушный поток уже начинается при расстоянии от обтекателя порядка одного его линейного размера, то есть на расстоянии также около 0,5 м. Очевидно, что такой профиль является оптимальным, и в связи с этим он был выбран в качестве обтекателя каретки инверсной установки ДЕТУ 02-06-11.

В качестве узла размещения СИТ, которому передается единица скорости воздушного потока, выбрана консоль такого же профиля НАСА 64015. Консоль устанавливается в центре тяжести каретки под углом $\Theta \approx 125^\circ$ по отношению к скорости набегающего воздушного потока, а узел крепления (цанговый зажим) СИТ выносится в точку М миделевого сечения обтекателя каретки (рис. 1), которая находится на расстоянии 0,5 м от него.

Таким образом, выполненные исследования позволили разработать методологию воспроизведения скорости низкоскоростных воздушных потоков, определить оптимальную конфигурацию обтекателя каретки инверсной аэродинамической установки эталона, профиль и линейные размеры консоли для размещения СИТ, которым передается единица скорости воздушного потока.

Реализация полученных результатов в ДЕТУ 02-06-11 позволила свести расширенную неопределенность его измерений до уровня $U_p = 0,24\%$ при коэффициенте охвата $k = 2$, что находится на уровне лучших аналогичных эталонов (стандартов) развитых стран, в частности, Бельгии, Дании и Швейцарии, неопределенность измерений которых составляет 0,2...0,5 %.

Список литературы

1. *Большаков В.Б.* Метрологічне забезпечення вимірювання швидкості повітряного потоку в Україні / В.Б. Большаков, Н.І. Косач, Є.І. Олійник // Український метрологічний журнал. – 2011. – № 3. – С. 55–64.
2. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М.: ГИТТЛ, 1950. – 424 с.
3. *Федяевский К.К.* Влияние степени турбулентности потока на лобовое сопротивление хорошо обтекаемых тел: технические заметки, № 126 / К.К. Федяевский, Н.Н. Фомина. – М.: ЦАГИ, 1936. – 25 с.
4. Альбом течений жидкости и газа: пер. с англ. М. Ван-Дата. – М.: Мир, 1986. – 56 с.