МЕТОД САМОГРАДУИРОВКИ ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ ПО СКОРОСТИ СОБСТВЕННЫХ ВЕРТИКАЛНЫХ ДВИЖЕНИЙ *IN SITU*

В.А. Гайский, П.В. Гайский

Морской гидрофизический институт
НАН Украины,
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: oaoimhi@inbox.ru

Предлагается метод самоградуировки переносных зондирующих или устанавливаемых на буе термоанемометрических измерителей скорости течения по измеренной скорости собственных движений. Приводятся расчетные формулы для измерителей с различными диаграммами направленности.

Известны термоанемометрические способы измерения скорости течения, в которых используется зависимость коэффициента теплообмена датчиков температуры со средой от скорости течения [1, 2].

Эти способы ограничены по точности из-за зависимости коэффициента теплообмена не только от скорости течения, но и от физических параметров воды (теплопроводности, теплоемкости, плотности и кинематической вязкости, изменяющихся от температуры и давления), режима течения (ламинарное или турбулентное) и состояния поверхности датчика. Эти параметры практически невозможно учесть при градуировке и проконтролировать в процессе измерения скорости течения в природных водах. Ставится задача самоградуировки термоанемометра в рабочем режиме.

Сущность метода состоит в следующем [3]. Переносные измерители скорости V_x горизонтальных течений в реках и водоемах обычно опускаются на различные глубины для измерения скорости течений на заданных горизонтах. Если прибор устанавливается стационарно на подвеске к бую, то он подвержен колебаниям по глубине из-за перемещений буя на волне или в потоке. Если это колебательное движение, то скорость перемещения всегда переменна. Таким образом, измерители течения в процессе использования совершают движения, в том числе принудительные. Если скорость этих движений контролировать, то ее можно использовать для текущей градуировки термоанемометра в рабочей среде и в процессе рабочих измерений.

Наиболее просто осуществить и проконтролировать вертикальные перемещения прибора. Например, определение вертикальной скорости перемещений прибора можно осуществить, дифференцируя глубину нахождения прибора, измеряемую датчиком гидростатического давления или обратным эхолотом.

При использовании датчиков глубины и вертикальных ускорений вертикальную скорость можно определить, интегрируя вертикальное ускорение и привязывая нуль интегратора по датчику глубины, когда глубина не изменяется или меняет знак.

В предлагаемом методе измерение вертикальной скорости перемещения термоанемометра может выполняться любым известным методом, удобным для конкретного применения.

При скорости горизонтального течения V_x и вертикальной скорости прибора $V_z(t)$ скорость обтекания термоанемометра потоком равна

$$V(t)=\sqrt{V_x^2+V_z^2(t)}\,.$$

При сферической диаграмме направленности $\rho(x,y)=\rho(\varphi)=1$ термоанемометр воспринимает скорость $V(t)$ с весом единица независимо от значений V_x и V_z.

При несферической диаграмме направленности, симметричной относительно осей ox и oz в плоскости xoz, можно записать $\rho(\varphi)$, где φ – угол вектора скорости $V(t)$ в плоскости xoz.

Предполагается, что значение $\rho(\varphi)$ известно из конструкции термоанемометра или из градуировки до рабочих измерений и остается постоянным.

Известно [1,2], что для термоанемометра с двумя датчиками температуры, у которых внешние геометрические размеры одинаковы и теплоемкости различны,

$$\frac{m_1c_1}{S_1}\neq\frac{m_2c_2}{S_2}\,,$$

где m – масса, c – удельная теплоемкость, S – площадь внешней поверхности теплообмена, текущий коэффициент теплообмена $\alpha(t)$ определяется из решения системы уравнений теплового баланса для двух датчиков температуры

$$\begin{cases} \theta_c(t) - \dfrac{m_1 c_1}{\alpha(t) S_1} \theta_1^{(1)}(t) = \theta_1(t) \\ \theta_c(t) - \dfrac{m_2 c_2}{\alpha(t) S_2} \theta_2^{(1)}(t) = \theta_2(t) \end{cases}$$

$$\alpha(t) = \frac{\dfrac{m_1 c_1}{S_1} \theta_1^{(1)}(t) - \dfrac{m_2 c_2}{S_2} \theta_2^{(1)}(t)}{\theta_2(t) - \theta_1(t)} = \frac{\theta_1^{(1)}(t) - K\theta_2^{(1)}(t)}{\theta_1(t) - \theta_2(t)},$$

где $K = \dfrac{m_2 c_2 S_2}{m_1 c_1 S_1}$; $\theta_1(t)$, $\theta_2(t)$ – температура соответственно первого и второго датчиков, а $\theta_1^{(1)}(t)$ и $\theta_2^{(1)}(t)$ – производные этих температур, $\theta_c(t)$ – температура среды.

Далее предполагается, что градуировочная характеристика $V = f(\alpha)$ описывается с достаточной точностью полиномом степени n, т.е. $V(t) = \sum_{i=0}^{n} b_i \alpha^i(t)$.

Для $n = 1$

$$V(t) = b_0 + b_1 \alpha(t),$$

$$V(t) \sqrt{V_x^2 + V_z^2(t)} = b_0 + b_1 \alpha(t),$$

$$V_x^2 + V_z^2(t) = [b_0 + b_1 \alpha(t)]^2 = b_0^2 + 2 b_0 b_1 \alpha(t) + b_1^2 \alpha^2(t).$$

Предполагается, что на коротком интервале времени, достаточном для получения $2n+1$ отсчетов разных вертикальных скоростей $V_z(t)$ и температур датчиков $\theta_1(t)$ и $\theta_2(t)$ и вычисления производных $\theta_1^{(1)}(t)$ и $\theta_2^{(1)}(t)$, коэффициенты b_i градуировочной характеристики термоанемометра и скорость V_x течения постоянны.

Из отсчетов для трех моментов времени получают

$$V_x^2 + V_z^2(1) = b_0^2 + 2 b_0 b_1 \alpha(1) + b_1^2 \alpha^2(1),$$
$$V_x^2 + V_z^2(2) = b_0^2 + 2 b_0 b_1 \alpha(2) + b_1^2 \alpha^2(2),$$
$$V_x^2 + V_z^2(3) = b_0^2 + 2 b_0 b_1 \alpha(3) + b_1^2 \alpha^2(3).$$

Вычитая из первого уравнения второе и третье, получают систему линейных алгебраических уравнений

$$\begin{cases} V_z^2(1) - V_z^2(2) = 2 b_0 b_1 [\alpha(1) - \alpha(2)] + b_1^2 [\alpha^2(1) - \alpha^2(2)] \\ V_z^2(1) - V_z^2(3) = 2 b_0 b_1 [\alpha(1) - \alpha(3)] + b_1^2 [\alpha^2(1) - \alpha^2(3)] \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} V_z^2(1) - V_z^2(2) = c_1 [\alpha(1) - \alpha(2)] + c_2 [\alpha^2(1) - \alpha^2(2)] \\ V_z^2(1) - V_z^2(3) = c_1 [\alpha(1) - \alpha(3)] + c_2 [\alpha^2(1) - \alpha^2(3)] \end{cases},$$

где $2 b_0 b_1 = c_1$, $b_1^2 = c_2$.

Расширенная матрица системы имеет вид

$$\left| \begin{array}{cc|c} \alpha(1)-\alpha(2) & \alpha^2(1)-\alpha^2(2) & V_z^2(1)-V_z^2(2) \\ \alpha(1)-\alpha(3) & \alpha^2(1)-\alpha^2(3) & V_z^2(1)-V_z^2(3) \end{array} \right|$$

Решение по правилу Крамера для неизвестных c_1 и c_2 имеет вид

$$c_1 = \frac{\left[V_z^2(1)-V_z^2(2)\right]\left[\alpha^2(1)-\alpha^2(3)\right]-\left[V_z^2(1)-V_z^2(3)\right]\left[\alpha^2(1)-\alpha^2(2)\right]}{\left[\alpha(1)-\alpha(2)\right]\left[\alpha^2(1)-\alpha^2(3)\right]-\left[\alpha^2(1)-\alpha^2(2)\right]\left[\alpha(1)-\alpha(3)\right]},$$

$$c_2 = \frac{\left[V_z^2(1)-V_z^2(3)\right]\left[\alpha(1)-\alpha(2)\right]-\left[V_z^2(1)-V_z^2(2)\right]\left[\alpha(1)-\alpha(3)\right]}{\left[\alpha(1)-\alpha(2)\right]\left[\alpha^2(1)-\alpha^2(3)\right]-\left[\alpha^2(1)-\alpha^2(2)\right]\left[\alpha(1)-\alpha(3)\right]}.$$

Для b_0 и b_1 получают $b_1 = \sqrt{c_2}$, $b_0 = \dfrac{c_1}{2b_1}$.

Скорости V_x горизонтального течения для момента времени t определяют по формуле

$$V_x = \sqrt{V^2(t)-V_z^2(t)} = \sqrt{\left[b_0 + b_1\alpha(t)\right]^2 - V_z^2(t)}.$$

Выполняют осреднение по трем моментам времени

$$V_x = \frac{1}{3}\sum_{t=1}^{3}\sqrt{\left[b_0 + b_1\alpha(t)\right]^2 - V_z^2(t)}.$$

Для $n = 2$

$$V = b_0 + b_1\alpha(t) + b_2\alpha^2(t),$$

$$\sqrt{V_x^2 + V_z^2(t)} = b_0 + b_1\alpha(t) + b_2\alpha^2(t),$$

$$V_x^2 + V_z^2(t) = \left[b_0 + b_1\alpha(t) + b_2\alpha^2(t)\right]^2 = b_0^2 + 2b_0b_1\alpha(t) + \left(2b_0b_2 + b_1^2\right)\alpha^2(t) + 2b_1b_2\alpha^3(t) + b_2^2\alpha^4(t).$$

Выполняя далее отсчеты для пяти моментов времени, вычитая попарно из первого другие уравнения, вводя обозначение неизвестных

$$2b_0b_1 = c_1, \quad 2b_0b_2 + b_1^2 = c_2,$$
$$2b_1b_2 = c_3 \text{ и } b_2^2 = c_4,$$

получают систему линейных алгебраических уравнений вида

$$\begin{cases} c_1[\alpha(1)-\alpha(2)]+c_2[\alpha^2(1)-\alpha^2(2)]+c_3[\alpha^3(1)-\alpha^3(2)]+c_4[\alpha^4(1)-\alpha^4(2)]=V_z^2(1)-V_z^2(2) \\ c_1[\alpha(1)-\alpha(3)]+c_2[\alpha^2(1)-\alpha^2(3)]+c_3[\alpha^3(1)-\alpha^3(3)]+c_4[\alpha^4(1)-\alpha^4(3)]=V_z^2(1)-V_z^2(3) \\ c_1[\alpha(1)-\alpha(4)]+c_2[\alpha^2(1)-\alpha^2(4)]+c_3[\alpha^3(1)-\alpha^3(4)]+c_4[\alpha^4(1)-\alpha^4(4)]=V_z^2(1)-V_z^2(4) \\ c_1[\alpha(1)-\alpha(5)]+c_2[\alpha^2(1)-\alpha^2(5)]+c_3[\alpha^3(1)-\alpha^3(5)]+c_4[\alpha^4(1)-\alpha^4(5)]=V_z^2(1)-V_z^2(5) \end{cases}.$$

Решают систему относительно c_1, c_2, c_3 и c_4 известным методом и определяют b_i в последовательности

$$b_2=\sqrt{c_4}\,,\quad b_1=\frac{c_3}{2b_2},\quad b_0=\frac{c_1}{2b_1}.$$

Определяют скорость V_x горизонтального течения для пяти моментов времени и осредняют по формуле

$$V_x=\frac{1}{5}\sum_{t=1}^{5}\sqrt{[b_0+b_1\alpha(t)+b_2\alpha^2(t)]^2-V_z^2(t)}\,.$$

Для произвольного n

$$V(t)=\sum_{i=0}^{n}b_i\,\alpha^i(t),$$

$$V_x^2+V_z^2(t)=\left[\sum_{i=0}^{n}b_i\,\alpha^i(t)\right]^2.$$

Обозначая произведение c_i двух коэффициентов b_j и b_S градуировочной характеристики термоанемометра, сумма индексов j и S которых равна i, получают

$$2\sum_{j,S}^{m}b_j\,b_S+b_{i/2}^2=c_i,\quad i=j+S,\quad i=\overline{1,(2n-1)},\quad j,S=\overline{0,n}\,,$$

где m – число произведений.

Обозначают $b_n^2=c_{2n}$.

Неизвестные c_i, $i=\overline{1,2n}$ определяют из решения системы линейных алгебраических уравнений вида

$$\sum_{i=1}^{2n}c_i\left[\alpha^i(1)-\alpha^i(t)\right]=V_z^2(1)-V_z^2(t),$$

$$t=\overline{2,(2n+1)}.$$

Далее определяют коэффициенты b_i, $i=\overline{0,n}$.

Определяют скорость V_x горизонтального течения по формуле

$$V_x=\frac{1}{2n+1}\sum_{t=1}^{2n+1}\sqrt{\left[\sum_{i=0}^{n}b_i\,\alpha^i(t)\right]^2-V_z^2(t)}\,,$$

$$t=\overline{2,(2n+1)}.$$

Если диаграмма направленности термоанемометра не является сферической и в плоскости xoz описывается функцией $\rho(\varphi)$, то вычисления V_x проводят в несколько итераций.

Первое вычисление выполняют при $\rho(1)$, т.е. как изложено выше. Для второго приближения вычисляют $\rho_1(\varphi,t)$ при $\varphi = arc\ tg \dfrac{V_z}{V_{x1}}$ для (2n+1) моментов времени по известным $V_z(t)$ и первому приближенному значению V_x.

Используя $\rho_1(\varphi,t)$, производят коррекцию квадратов значений вертикальной скорости V_z^2 умножением на $\rho_1^2(\varphi,t)$.

При этом строки столбца свободных членов системы

$$\sum_{i=1}^{2n} c_i\left[\alpha^i(1) - \alpha^i(t)\right] = V_z^2(1) - V_z^2(t)$$

будут иметь вид

$$V_z^2(1)\rho_1^2(\varphi,1) - V_z^2(t)\rho_1^2(\varphi,t),$$

$$t = \overline{2,(2n+1)}.$$

Выполняют второе приближение, решая систему уравнений

$$\sum_{i=1}^{2n} c_i\left[\alpha^i(1) - \alpha^i(t)\right] = V_z^2(1)\rho_1^2(\varphi,t) - V_z^2(t)\rho_1^2(\varphi,t)$$

относительно c_i и далее – b_i, и затем – V_x.

Выполняют итерации до получения устойчивого значения V_x.

Таким образом, для r-итерации строки столбца свободных членов системы уравнений будут иметь вид

$$V_z^2(1)\rho_r^2(\varphi,1) - V_z^2(t)\rho_r^2(\varphi,t),$$

$t = \overline{2,(2n+1)}$, $r = \overline{1,l}$,

где l – число итераций.

Заключение. Предложен метод определения коэффициентов полиномиальной градуировочной характеристики термоанемометра в рабочем режиме по известным скоростям вертикальных перемещений. В дальнейшем представляет интерес развитие метода на другие формы градуировочных характеристик.

Литература

1. Гайский В.А., Гайский П.В. Анализ способов измерения профиля скорости потока термопрофилемерами // Системы контроля окружающей среды / Сб. научн. тр. НАНУ. – Севастополь: МГИ. 2001. – С. 7–22.

2. Патент України № 49049 на винахід, МПК7 G01P5/10, опубл. 16.09.2002, бюл. № 9. «Спосіб визначення швидкості потоку». Автори: Гайський В.О. і Гайський П.В.

3. Патент України № 86239 на винахід, МПК9 G01P5/10, опубл. 10.04.2009, бюл. № 7. «Спосіб визначення швидкості течії». Автори: Гайський В.О. і Гайський П.В.