СПОСОБ ГРАДУИРОВКИ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ СКОРОСТИ ПОТОКА В РАБОЧЕМ РЕЖИМЕ

В.А.Гайский, П.В.Гайский

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: oaoi@alpha.mhi.iuf.net

Предлагается способ определения коэффициентов градуировочной характеристики измерителя скорости потока, основанный на контроле встроенным акселерометром собственных перемещений измерителя в потоке.

Известны способы градуировки измерителей скорости потока на специальных аэро- или гидродинамических стендах, где скорость потока задается и контролируется образцовым измерительным средством и коэффициенты градуировочной характеристики аттестуемого измерителя определяются по показаниям измерителя и образцового средства в рабочем диапазоне скоростей потока.

Общим недостатком этих способов градуировки измерителей скорости потока, характеристики которых зависят от физических параметров среды, является ограниченная точность из-за того, что физические параметры среды (температура, теплоемкость, теплопроводность, плотность, кинематическая вязкость, электропроводность, скорость звука) и характеристики потоков (спектр турбулентности и его пространственная анизотропия) в стенде и в реальной среде почти всегда различны.

Например, это характерно для гидродинамических, термоанемометрических и акустических измерителей, содержащих датчики скорости обтекания потоком [1].

Сущность способа состоит в следующем. Рассматриваем измерители вектора или модуля скорости потока, градуировочные характеристики которых по i-ой координате в приборной системе координат с достаточной точностью аппроксимируются полиномом (1)

$$V_i(N_i)=\sum_{j=0}^{m} a_{ij}\,\varphi_{ij}(N_i) \quad , \qquad (1)$$

где N_i – показания измерителя по i-ой координате при значении V_i составляющей скорости обтекания по i-ой координате; a_{ij} – коэффициенты градуировочной характеристики, которые надо определить $\left(j=\overline{0,m}\right)$; φ_{ij} – система известных функций, принятая для измерителя из физических соображений или экспериментальных данных.

В частности, если градуировочная характеристика измерителя удовлетворительно аппроксимируется степенным полиномом степени m, то

$$\begin{aligned} &\varphi_{i0}(N_i)=1 \ , \\ &\varphi_{i1}(N_i)=N_i \ , \\ &- - - - - \\ &\varphi_{ij}(N_i)=N_i^j \ , \\ &- - - - - \\ &\varphi_{im}(N_i)=N_i^m \end{aligned} \qquad (2)$$

и выражение принимает вид

$$V_i(N_i)=a_{i0}+a_{i1}N_i+a_{i2}N_i^2+\ \dots\ a_{im}N_i^m \ . \qquad (3)$$

Такие градуировочные характеристики характерны для акустических измерителей скорости потока.

Для аэро-гидродинамических измерителей (типа трубки Пито) характерна градуировочная характеристика вида

$$V_i(N_i)=a_{i1}\,N_i^{\frac{1}{2}}, \qquad (4)$$

где N_i – отсчеты давления напора от потока, здесь $\varphi_{i1}(N_i)=N_i^{\frac{1}{2}}$.

Для термоанемометрического измерителя типовая градуировочная характеристика имеет вид

$$V_i(N_i)=a_{i0}+a_{i1}N_i^{\kappa}, \qquad (5)$$

где a_{i0} – коэффициент, пропорциональный коэффициенту теплообмена датчика со средой при отсутствии потока при $V_i=0$ и зависящий от физических параметров среды; a_{i1} – коэффициент, зависящий от конструкции датчика, физических параметров среды и характеристик потока; N_i – отсчеты показаний измерителя, пропорциональные коэффициенту теплообмена датчика со средой, зависящему от скорости потока; κ – коэффициент, зависящий от характеристики потока, определяемый числом Рейнольдса и принимающий значения от 0,2 до 0,6; здесь $\varphi_{i0}=1$; $\varphi_{i1}=N_i^{\kappa}$.

При одновременной во времени фиксации отсчетов измерителя скорости потока $N_i(t)$ и показаний датчика ускорений собственных движений $g_i(t)$ получают два ряда отсчетов при $t=\overline{1,l}$.

Для скорости обтекания датчика скорости потока по i-ой координате можно записать

$$V_i(t)=V_{ix}(t)+V_{i0}(t), \qquad (6)$$

где $V_{ix}(t)$ – составляющая скорости потока; $V_{i0}(t)$ – составляющая собственной скорости датчика.

Отсчеты $N_i(t)$ соответствуют градуировочной характеристике скорости обтекания датчика $V_i(t)$.

Если за время l отсчетов составляющая скорости потока $V_{ix}(t)$ меняется незначительно так, что можно принять $\frac{\partial V_{ix}}{\partial t}\approx 0$, а скорость собственных движений датчика $V_{i0}(t)$ изменяется существенно $\frac{\partial V_{i0}}{\partial t}\neq 0$ (что вполне реализуемо), то для производной выражения (6) можем записать

$$\frac{\partial V_i(t)}{\partial t}=\frac{\partial V_{i0}(t)}{\partial t}\approx g_i(t) \ . \qquad (7)$$

Дифференцируя выражение (1) для ряда $N_i(t)$ по градуировочной характеристике, получим

$$\frac{\partial V_i(t)}{\partial t}=g_i(t)=\sum_{j=1}^{m} a_{ij}\,\varphi_{ij}^{(1)}\left[N_i(t)\right],$$

$$t=\overline{1,l}; \quad l\geq m, \qquad (8)$$

где $\varphi_{ij}^{(1)}\left[N_i(t)\right]$ - первые производные по времени функций $\varphi_{ij}\left[N_i(t)\right]$, которые вычисляются по ряду $N_i(t)$. Эти данные позволяют определить коэффициенты a_{ij} для $j=\overline{1,m}$.

При фиксации отсчета N_{i0} датчика скорости потока в рабочей среде при отсутствии скорости потока и собственной скорости определяют коэффициент $a_{i0}\neq 0$ по выражению

$$a_{i0}=-\sum_{j=1}^{m} a_{ij}\,\varphi_{ij}\left(N_{i0}\right) \ . \qquad (9)$$

В частном случае для градуировочной характеристики измерителя скорости потока в виде степенного полинома вида (3) получим

$$g_i(t)=a_{i1}N_i^{(1)}(t)+2a_{i2}\,N_i(t)\,N_i^{(1)}(t)+\ldots$$

$$\ldots+ma_{im}\,N_i^{m-1}(t)\,N_i^{(1)}(t) \qquad (10)$$

или

$$\frac{g_i(t)}{N_i^{(1)}(t)}=a_{i1}+2a_{i2}\,N_i(t)+\ldots$$

$$\ldots+ma_{im}\,N_i^{m-1}(t) \qquad (11)$$

В случае высокоточной модели градуировочной характеристики и малых шумов, при $t=\overline{1,l}$, $l\geq m$ выражение (11) дает систему из m линейных алгебраических уравнений с m неизвестными a_{ij} $\left(j=\overline{1,m}\right)$, которая может решаться относительно a_{ij} известными способами, например, по правилу Крамера.

В случае не очень точной модели и при наличии шумов градуировочные коэффициенты a_{ij} $\left(j=\overline{1,m}\right)$ могут быть также определены как коэффициенты регрессии по рядам $g_i(t)$ и $N_i(t)$ и выражению (11) методом наименьших квадратов.

При малом уровне шумов в отсчетах $g_i(t)$ и $N_i(t)$ и m–дифференцируемости функций ускорения собственных движений для вычисления коэффициентов a_{ij} могут быть использованы рекуррентные формулы.

Введем обозначения

$$\psi_0^{(1)}(t)=g_i(t), \qquad \psi_1(t)=\frac{g_i(t)}{N_i^{(1)}},$$

$$\psi_2(t)=\frac{\psi_1^{(1)}(t)}{N_i^{(1)}(t)}, \quad .. \ \psi_j(t)=\frac{\psi_{(j-1)}^{(1)}(t)}{N_i^{(1)}(t)} \ . \qquad (12)$$

Тогда после m-го дифференцирования выражения (10) получим

$$a_{im}=\frac{\psi_m(t)}{m!}\ , \qquad a_{i(m-1)}=\frac{\psi_{(m-1)}(t)-\psi_m(t)N_i(t)}{(m-1)!}\ ,$$

$$a_{i(m-2)}=\frac{\psi_{(m-2)}(t)-\psi_{(m-1)}(t)N_i(t)+\frac{1}{2}\psi_m(t)N_i^2(t)}{(m-2)!}\ ,$$

$$a_{i(m-3)}=\frac{\psi_{(m-3)}(t)-\psi_{(m-2)}(t)N_i(t)+\frac{1}{2}\psi_{(m-1)}(t)N_i^2(t)+\frac{1}{3}\psi_m(t)N_i^3(t)}{(m-3)!}, \tag{13}$$

$$a_{ij}=\frac{\psi_j(t)-\psi_{(j+1)}(t)N_i(t)+\sum\limits_{S=2}^{m-j}\frac{1}{S}\psi_{(j+S)}(t)N_i^S(t)}{j!}, \qquad j=\overline{1,m}.$$

Предполагается, что вычисление функции $\psi_j(t)$ производится численно по рядам отсчетов. Малый уровень шумов в рядах отсчетов $N_i(t)$ возможен при ламинарном потоке, а m–дифференцируемость функции $g(t)$ может быть обеспечена при поступательно-возвратном движении измерителя по i-ой координате, когда скорость собственных движений является периодической функцией.

Для градуировочной характеристики вида (4) получим выражение

$$g_i(t)=\frac{1}{2}\,a_{i1}N_i^{-\frac{1}{2}}(t)N_i^{(1)}(t)\ , \tag{14}$$

из которого

$$a_{i1}=\frac{2g_i(t)N_i^{\frac{1}{2}}(t)}{N_i^{(1)}(t)} \tag{15}$$

Для градуировочной характеристики вида (5) получим

$$g_i(t)=m\,a_{i1}N_i^{m-1}(t)N_i^{(1)}(t), \tag{16}$$

где неизвестными являются m и a_{i1}.

Берем отсчеты для двух моментов времени t_1 и t_2. Можем записать

$$\frac{g_i(t_1)}{g_i(t_2)}=\frac{N_i^{m-1}(t_1)N_i^{(1)}(t_1)}{N_i^{m-1}(t_2)N_i^{(1)}(t_2)}\ . \tag{17}$$

Отсюда

$$\kappa=\frac{\ell n\left[N_i^{(1)}(t_2)g_i(t_1)\right]-\ell n\left[N_i^{(1)}(t_1)g_i(t_2)\right]}{\ell n N_i(t_1)-\ell n N_i(t_2)}+1\,. \tag{18}$$

Далее из выражения (16)

$$a_{i1}=\frac{g_i(t)}{\kappa N_i^{n-1}(t)N_i^{(1)}(t)}\ , \tag{19}$$

$$a_{i0}=-a_{i1}N_{i0}^{\kappa}\ . \tag{20}$$

Таким образом определяются коэффициенты градуировочных характеристик типовых моделей измерителей скорости потока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Принципы построения технических средств исследования океана. – М.: Наука, 1981. – С. 29–31.