

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОФИЛЯ СКОРОСТИ ПОТОКА ТЕРМОПРОФИЛЕМЕРАМИ

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

Широко используются теплообменные и корреляционные способы измерения скорости потоков газов и жидкостей контактными датчиками температуры [1]. Представляет интерес анализ реализации этих способов несколькими датчиками и термопрофилемерами для измерения профилей скорости потока.

Тепловые модели датчика

Термопрофилемеры обычно изготавливаются в виде цилиндрических кабелей, поэтому далее датчик рассматривается как однородный цилиндр диаметром d (радиусом r) неограниченной длины с погонной массой m и площадью поверхности S на единицу длины из материала с удельной теплоемкостью c . Датчик считается сосредоточенным элементом. Для внешних тепловых процессов, лежащих в полосе частот ниже частоты $f_m < \tau^{-1}$, равномерно прогреваемых датчик, можно определить τ из критерия Фурье [1]

$$F_0 = \frac{\alpha \tau}{r^2} < 1, \quad \text{где } \alpha - \text{температуро-}$$

проводность материала датчика.

При внутреннем нагреве считается, что равномерный прогрев осуществляется одновременно по всему объему датчика.

Рассматриваются две простейшие тепловые модели :

- пассивный датчик;
- активный датчик, нагреваемый или охлаждаемый изнутри.

Уравнение теплового баланса имеет вид [2, 3] :

$$[\theta_c(t) - \theta(t)]\alpha(t)S = mc\theta'(t), \quad (1)$$

где $\theta(t)$ и $\theta_c(t)$ - температуры датчика и среды, $\alpha(t)$ - коэффициент теплоотдачи датчика, $\theta'(t) = \frac{\partial \theta}{\partial t}$.

Для уравнений преобразования измеряемых величин в стандартной форме можем записать

$$\theta_c(t) = \theta(t) + \frac{mc}{\alpha(t)S} \theta'(t), \quad (1a)$$

$$\alpha(t) = \frac{mc\theta'(t)}{[\theta_c(t) - \theta(t)]S}. \quad (1b)$$

Для активного датчика уравнение теплового баланса имеет вид [2, 3] :

$$P(t) = [\theta(t) - \theta_c(t)]\alpha(t)S + mc\theta'(t), \quad (2)$$

где $P(t)$ - тепловой поток от внутреннего нагревателя (охлаждителя).

Уравнения преобразования будут иметь вид :

$$\theta_c(t) = \theta(t) + \frac{1}{\alpha(t)S} [mc\theta'(t) - P(t)], \quad (2a)$$

$$\alpha(t) = \frac{[mc\theta'(t) - P(t)]}{[\theta(t) - \theta_c(t)]S}. \quad (2b)$$

Для параметра тепловой инерции (здесь это непостоянная величина) запишем

$$T(t) = \frac{mc}{\alpha(t)S}. \quad (3)$$

Во всех приведенных выше выражениях один пассивный датчик имеет две входных измеряемых величины $\theta_c(t)$ и $\alpha(t)$ и только одну реально наблюдаемую выходную величину $\theta(t)$.

Поэтому корректное определение этих входных величин возможно при наложении определенных ограничений на их значения или совместные изменения, или при использовании нескольких датчиков. Обе эти величины используются для определения скорости потока.

Коэффициент теплоотдачи

Рассмотрим зависимость коэффициента теплоотдачи от параметров датчика, среды и скорости обтекания. Точных аналитических выражений нет, а есть эмпирические зависимости. Известно [4], что для цилиндра в поперечном потоке газа

$$\alpha_r(t) \approx \frac{c_0 \lambda}{d} \text{Re}^n, \quad (4)$$

где λ - теплопроводность газа, c_0 и n - табличные коэффициенты, зависящие от числа Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{v d}{\nu}, \quad (5)$$

где v - скорость потока, ν - кинематическая вязкость.

Эти коэффициенты принимают значения $c_0 \approx 0,2 \div 0,93$ и $n = 0,4 \div 0,6$. Из выражений 4 и 5 можем записать

$$\alpha_r(t) \approx d^{n-1} c_0 \lambda v^{-n} v^n(t). \quad (6)$$

Для потока жидкости коэффициент теплоотдачи датчика равен [4]:

$$\alpha(t) \approx d^{-1} c_0 \lambda_c \text{Re}^n \text{Pr}^{0,4}, \quad (7)$$

где Pr - критерий Прандтля

$$\text{Pr} = v_c c_c \gamma_c \lambda_c^{-1} = \frac{v}{a}, \quad (8)$$

где c_c - удельная теплоемкость, γ_c - плотность, λ_c - теплоемкость жидкости, $a_c = \frac{\lambda_c}{c_c \gamma_c}$ - коэффициент температуропроводности среды.

В итоге

$$\alpha(t) \approx c_0 d^{n-1} v_c^{0,4-n} \lambda_c^{0,6} \gamma_c^{0,4} c_c^{0,4} v^n(t), \quad (9)$$

$$v(t) \approx \sqrt[2]{k \alpha(t)}. \quad (10)$$

Физические параметры среды не являются постоянными величинами и зависят от температуры и давления. Например, для морской воды в естественных условиях

теплопроводность

$$\lambda_c \approx 0,55 \div 0,62 \text{ вт/мК},$$

кинематическая вязкость

$$v_c \approx 7 \cdot 10^{-7} \div 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с},$$

плотность

$$\gamma_c \approx 975 \div 1025 \text{ кг/м}^3,$$

удельная теплоемкость

$$c_c \approx 4180 \div 4320 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}.$$

На рис.1 представлен диапазон возможных значений $\alpha(t)$ от $v(t) = 0,02 \div 10 \text{ м/с}$ по выражению 9 при различных значениях физических параметров среды и $c_0 = 0,3$; $n = 0,5$; $d = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Из графика можно сделать вывод, что зависимость коэффициента теплоотдачи датчика и среды приходит в насыщение при скоростях $v > 6 \text{ м/с}$ и, что влияние других физических параметров среды сказывается на уровне единиц процента и может не учитываться, если это удовлетворяет требованиям точности. Из-за необходимости корректировать параметры c_0 и n в зависимости от v формулы 9 и 10 вряд ли могут быть рабочими и их следует заменить на градуировочную характеристику для конкретного датчика.

Способы одновременного определения температуры среды и коэффициента теплоотдачи датчика

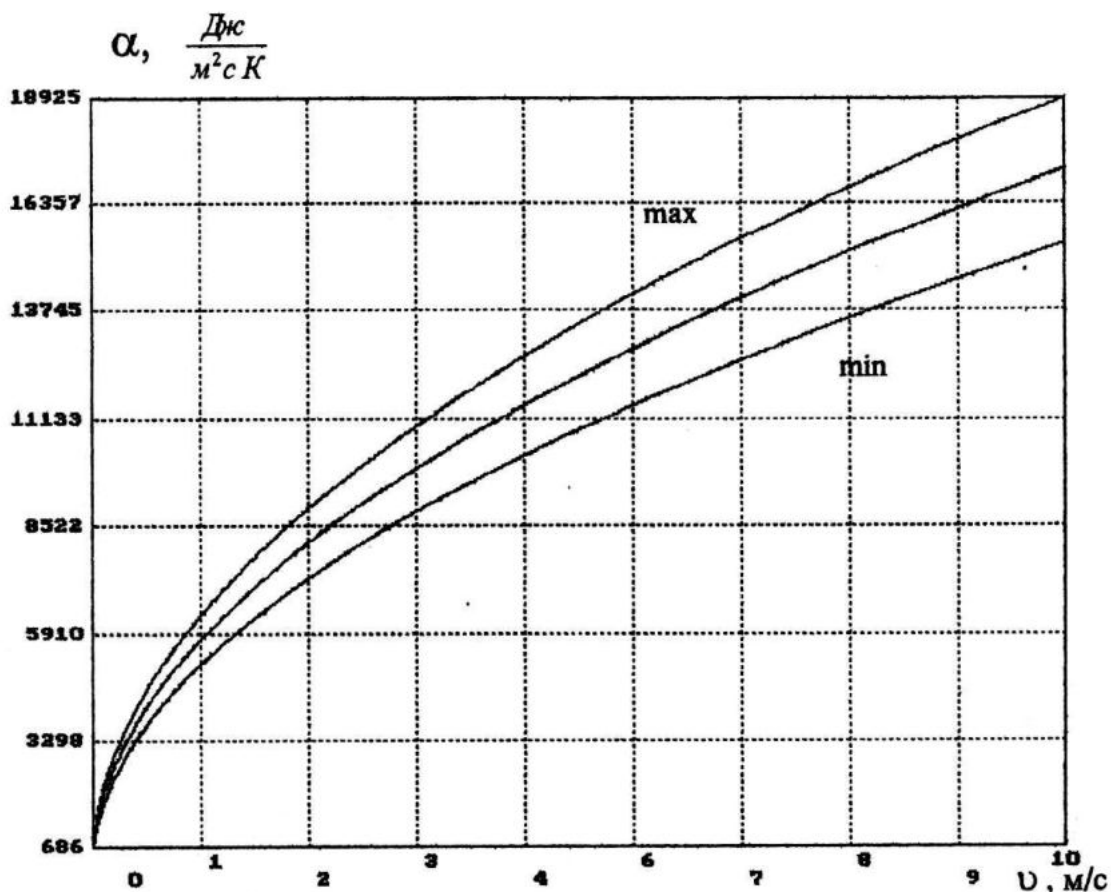


Рис.1 График диапазона возможных значений $\alpha(t)$ от $\nu(t)$ при различных значениях физических параметров среды

Далее предполагаем, что результатом собственно измерений является текущая температура датчика $\theta(t)$, а тепловой поток нагрева $P(t)$ известен или измеряется.

Конструктивные параметры датчика (S, d, m) и свойства его материала (c) предполагаются известными или исключаются из результата вычисления величин $\theta'(t)$, $\theta_c(t)$ и $\alpha(t)$.

Для двух параллельных датчиков с разными диаметрами d_1 и d_2 введем коэффициент γ такой, что

$$\gamma = \frac{\alpha_2(t)}{\alpha_1(t)}, \quad (11)$$

для которого из 9 получим

$$\gamma = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^{n-1}. \quad (12)$$

Рассмотрим все способы (известные и которые удалось придумать) измерения $\theta_c(t)$ и $\alpha(t)$ с помощью одного или двух пассивных или активных датчиков. Эти способы представлены в таблице 1, в первом столбце которой указан состав датчиков, а в следующих столбцах вводимые и используемые ограничения, изменяемые и измеряемые величины и результаты.

Способ 1а

Использование одного пассивного датчика в режиме принудительного обтекания потоком со скоростью, при которой коэффициент теплоотдачи достигает насыщения. При этом $\alpha(t) \cong const$, параметр тепловой инер-

ции $T \equiv const$ и его значение известно из градуировки и может быть использовано для коррекции динамической погрешности измерения температуры среды

$$\theta_c(t) = \theta(t) + T\theta'(t). \quad (13)$$

Этот способ измерения температуры среды обычно используется в зондирующих и буксируемых гидрофизических приборах [5].

Недостатки : коэффициент теплоотдачи не измеряется; точность динамической коррекции измерений температуры ограничена из-за нестационарности коэффициента теплоотдачи.

Способ 1б

Организация специальной траектории перемещения пассивного датчика в стратифицированной среде [6] или использование неподвижного датчика но с фиксацией моментов времени τ , при которых

$$\theta'(\tau) = 0. \quad (14)$$

При этом $\theta_c(\tau) = \theta(\tau)$. (14а)

Имеет место полная независимость результата измерения температуры среды от параметра тепловой инерции T и коэффициента теплоотдачи α .

Недостатки : коэффициент теплоотдачи не измеряется; асинхронная последовательность отсчетов температуры среды.

Действительно, из уравнения 1б можем записать систему

$$\begin{aligned} \alpha(1,2,3) S[\theta(1) - \theta(2)] + mc[\theta'(1) - \theta'(2)] &= P(1) - P(2), \\ \alpha(1,2,3) S[\theta(2) - \theta(3)] + mc[\theta'(2) - \theta'(3)] &= P(2) - P(3). \end{aligned} \quad (17)$$

Решение которой имеет вид

$$\alpha(1,2,3) S = \frac{[P(1) - P(2)][\theta'(2) - \theta'(3)] - [P(2) - P(3)][\theta'(1) - \theta'(2)]}{[\theta(1) - \theta(2)][\theta'(2) - \theta'(3)] - [\theta(2) - \theta(3)][\theta'(1) - \theta'(2)]}, \quad (17а)$$

$$mc = \frac{[\theta(1) - \theta(2)][P(2) - P(3)] - [P(1) - P(2)][\theta(2) - \theta(3)]}{[\theta(1) - \theta(2)][\theta'(2) - \theta'(3)] - [\theta(2) - \theta(3)][\theta'(1) - \theta'(2)]}. \quad (17б)$$

Способ 2а

Использование одного активного датчика с контролируемой и "быстро" изменяемой подводимой мощностью $P(t)$ нагрева (охлаждения) и фиксацией двух последовательных отсчетов температуры датчика $\theta(1)$ и $\theta(2)$ и двух отсчетов мощности $P(1)$ и $P(2)$ с такими интервалом времени между отсчетами, за который изменением температуры среды и коэффициента теплоотдачи можно пренебречь, т.е.

$$\theta_c(1) = \theta_c(2) = \theta_c(1,2) \text{ и } \alpha(1) = \alpha(2) = \alpha(1,2)$$

Тогда из двух уравнений вида 2 получим

$$\begin{aligned} \theta_c(1,2) &= \\ &= \frac{\theta(2)[P(1) - mc\theta'(1)] - \theta(1)[P(2) - mc\theta'(2)]}{P(1) - P(2) + mc[\theta'(2) - \theta'(1)]}, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\alpha(1,2) = \frac{P(1) - P(2) - mc[\theta'(1) - \theta'(2)]}{S[\theta(1) - \theta(2)]}. \quad (16)$$

Недостатки : ограничение на неизменность параметров среды за время двух отсчетов; необходимость знания mc .

Способ 2б

Если параметры среды $\theta_c(t)$ и $\alpha(t)$ не изменяются в течение трех отсчетов, то возможно определение параметра датчика mc .

Далее полученное значение mc используется в выражении 15 для вычисления $\theta_c(1,2,3)$.

Недостатки : ограничение на неизменность параметров среды на время трех отсчетов.

Способ 2в

Аналогично способу 2а, но с заданием $P(t)$ как периодически изменяемой подводимой мощностью $\tilde{P}(t)$ на фоне постоянной составляющей мощности P_0 и фиксацией отсчетов мощности и температуры датчика в моменты времени τ , когда $\theta'(\tau) = 0$.

При этом из уравнения 2 получим

$$\theta_c(\tau) = \theta(\tau) - \frac{P(\tau)}{\alpha(\tau)S}. \quad (18)$$

Используя отсчеты в два момента времени, получим

$$\theta_c(1) = \frac{P(1)\theta(2) - P(2)\theta(1)}{P(1) - P(2)}, \quad (19)$$

$$\alpha(1)S = \frac{P(1) - P(2)}{\theta(1) - \theta(2)}. \quad (20)$$

Способ 2г

Если при работе по способу 2в получить третий промежуточный отсчет $\theta(3)$ и $P(3)$ между двумя указанными выше моментами времени, то можно определить параметр тепловой инерции датчика $T(1)$ в рабочем режиме. Действительно, из уравнения 2 при известных $\theta_c(1)$ и $\alpha(1)S$ можем записать

$$\theta_c(1) = \theta(3) + T(1)\theta'(3) - \frac{P(3)}{\alpha(1)S}, \quad (21)$$

$$T(1) = \frac{1}{\theta'(3)} \left[\theta_c(1) - \theta(3) + \frac{P(3)}{\alpha(1)S} \right]. \quad (22)$$

Здесь не требуется априорного знания конструктивного параметра mc датчика. Фактически для определения τ из $\theta'(\tau) = 0$ потребуется "непрерывный" ряд отсчетов $\theta(t)$, из

которого в уравнения 19-20 войдут только те $\theta(\tau)$, для которых $\theta'(\tau) = 0$, а в уравнение 22 войдут промежуточные отсчеты.

Недостатки : ограничение на неизменность параметров среды между двумя избранными отсчетами.

Способ 2д

Использование управления тепловым режимом датчика для коррекции динамической погрешности.

Из выражения 2 при $\theta_c(t) = \theta(t)$ получим

$$mc\theta'(t) - P(t) = 0. \quad (23)$$

Следовательно, если обеспечить выполнение условия 23 за счет нагрева и охлаждения датчика, то температура датчика будет всегда равна температуре среды. Реализация такой системы регулирования на основе обратимого термоэлектрического преобразователя для точечного датчика возможна.

Недостатки : не определяется коэффициент теплоотдачи; нет реализации для распределенных датчиков.

Способ 3а

Использование двух пассивных датчиков с разными параметрами тепловой инерции T_1 и T_2 в режиме стабилизации коэффициента теплоотдачи за счет постоянной скорости обтекания потоком и накопления отсчетов. За два последовательных момента времени такой режим характерен для зондирующих и буксируемых приборов. Из выражения 1 для двух датчиков и двух моментов времени получим систему уравнений

$$\left. \begin{array}{l} \theta_c(1) - T_1 \theta'_1(1) = \theta_1(1) \\ \theta_c(1) - T_2 \theta'_2(1) = \theta_2(1) \\ \theta_c(2) - T_1 \theta'_1(2) = \theta_1(2) \\ \theta_c(2) - T_2 \theta'_2(2) = \theta_2(2) \end{array} \right\}, \quad (24)$$

решение которой относительно температуры среды $\theta_c(1)$, $\theta_c(2)$ и параметров T_1 и T_2 , постоянных на протяжении двух отсчетов, имеет вид

$$\theta_c(1) = \frac{\theta'_1(1)\theta'_2(2)\theta_2(2) - \theta'_1(1)\theta'_2(2)\theta_2(1) - \theta'_1(1)\theta'_2(2)\theta_1(2) + \theta'_1(2)\theta'_2(1)\theta_1(1)}{\theta'_1(1)\theta'_2(2) - \theta'_2(1)\theta'_1(2)}, \quad (25)$$

$$\theta_c(2) = \frac{\theta'_1(2)\theta'_2(2)\theta_2(1) - \theta'_2(1)\theta'_1(2)\theta_2(2) - \theta'_1(2)\theta'_2(2)\theta_1(1) + \theta'_1(1)\theta'_2(2)\theta_1(2)}{\theta'_1(1)\theta'_2(2) - \theta'_2(1)\theta'_1(2)},$$

$$T_1 = \frac{\theta'_2(2)\theta_2(1) - \theta'_2(1)\theta_2(2) - \theta'_2(2)\theta_1(1) + \theta'_2(1)\theta_1(2)}{\theta'_1(1)\theta'_2(2) - \theta'_2(1)\theta'_1(2)}, \quad (26)$$

$$T_2 = \frac{\theta'_1(2)\theta_2(1) - \theta'_1(2)\theta_1(1) - \theta'_1(1)\theta_2(2) + \theta'_1(1)\theta_1(2)}{\theta'_1(1)\theta'_2(2) - \theta'_2(1)\theta'_1(2)}.$$

Недостатки : необходимость обеспечения условий, при которых коэффициент теплоотдачи существенно не изменится, а температура среды изменится за время двух последовательных отсчетов.

Способ 3б

Использование двух пассивных датчиков с идентичными конструктивными размерами - диаметром d и площадью S (следовательно, равными коэффициентами теплоотдачи $\alpha_1 = \alpha_2$), но с разной теплоемкостью ($m_1 c_1 \neq m_2 c_2$).

Это метод 1 Г.Пфрима [7]. Из выражения 1 для этого случая получим соответствующую систему уравнений и ее решение :

$$\theta_c(t) = \frac{m_2 c_2 \theta_1(t) \theta'_2(t) - m_1 c_1 \theta_2(t) \theta'_1(t)}{m_2 c_2 \theta'_2(t) - m_1 c_1 \theta'_1(t)}, \quad (27)$$

$$\alpha(t) = \frac{m_1 c_1 \theta'_1(t) - m_2 c_2 \theta'_2(t)}{S[\theta_2(t) - \theta_1(t)]}. \quad (28)$$

Недостатки : необходимость обеспечения идентичности датчиков по форме и различных по теплоемкости с априорным знанием ее величины.

Способ 3в

Использование двух разных пассивных датчиков с известным отношением $\gamma = \frac{\alpha_2(t)}{\alpha_1(t)}$.

Это метод 2 Г.Пфрима [1]. Из выражения 1 для двух разных датчиков получим систему из двух уравнений, решение которой имеет вид :

$$\theta_c(t) = \frac{m_2 c_2 S_1 \theta_1(t) \theta'_2(t) - m_1 c_1 S_2 \theta_2(t) \theta'_1(t)}{m_2 c_2 S_1 \theta'_2(t) - m_1 c_1 S_2 \theta'_1(t)}, \quad (29)$$

$$\alpha_1(t) = \frac{m_1 c_1 S_1^{-1} \theta'_1(t) - m_2 c_2 S_2^{-1} \theta'_2(t)}{\theta_1(t) - \theta_2(t)}. \quad (30)$$

Недостатки : необходимость знания конструктивных параметров датчиков и обеспечение $\gamma = const$ в диапазоне возможных скоростей обтекания (фактически сужение диапазона скоростей).

Способ 4а

Использование одного пассивного и одного активного датчика с одинаковыми конструктивными параметрами (m, c, S).

Это метод 3 Г.Пфрима [7]. При решении системы двух уравнений, образованных из выражений 1 и 2 получим :

$$\theta_c(t) = \frac{\theta_1(t) [\theta_2'(t) - \frac{P(t)}{mc}] - \theta_2(t) \theta_1'(t)}{\theta_2'(t) - \frac{P(t)}{mc} - \theta_1'(t)}, \quad (31)$$

$$\alpha(t) = \frac{mc[\theta_1'(t) - \theta_2'(t)] + P(t)}{S[\theta_2(t) - \theta_1(t)]}. \quad (32)$$

Недостатки : необходимость обеспечения идентичности конструктивных параметров датчиков и их знания.

Способ 4б

Если подогрев $P(t)$ активного датчика сделать регулируемым так, чтобы разность температур активного и пассивного датчиков поддерживалась заданной, т.е.

$$\theta_c(t) = \frac{\theta_1(t) S_1 [m_2 c_2 \theta_2'(t) - P(t)] - m_1 c_1 \gamma S_2 \theta_2(t) \theta_1'(t)}{S_1 [m_2 c_2 \theta_2'(t) - P(t)] - m_1 c_1 \gamma S_2 \theta_1'(t)}, \quad (37)$$

$$\alpha_1(t) = \frac{m_2 c_2 (\gamma S_2)^{-1} \theta_2'(t) - (\gamma S_2)^{-1} P(t) - m_1 c_1 S_1^{-1} \theta_1'(t)}{\theta_1(t) - \theta_2(t)}. \quad (38)$$

Недостатки : необходимость знания конструктивных параметров датчиков.

Способ 5а

Использование двух активных

$$\theta_c(t) = \frac{\theta_2(t) [P_1(t) - mc\theta_1'(t)] - \theta_1(t) [P_2(t) - mc\theta_2'(t)]}{P_1(t) - P_2(t) + mc[\theta_2'(t) - \theta_1'(t)]}, \quad (39)$$

$$\alpha(t) = \frac{P_1(t) - P_2(t) - mc[\theta_1'(t) - \theta_2'(t)]}{S[\theta_1(t) - \theta_2(t)]}. \quad (40)$$

$$\theta_2(t) - \theta_1(t) = \Delta\theta = const, \quad (33)$$

$$\theta_2'(t) - \theta_1'(t) = 0, \quad (34)$$

и из выражений 30 и 31 получим

$$\theta_c(t) = \frac{\theta_2'(t) mc}{P(t)} + \theta_1(t), \quad (35)$$

$$\alpha(t) = \frac{P(t)}{S \Delta\theta}. \quad (36)$$

Последнее выражение удобно для аналоговой реализации.

Недостатки : для распределенных датчиков термопрофилимера реализуется последовательно по участкам профиля, что для нестационарного потока делает измерения профиля температуры и скорости некорректными.

Способ 4в

Использование пассивного и активного датчиков с разными конструктивными параметрами ($m_1 c_1 \neq m_2 c_2, d_1 \neq d_2, S_1 \neq S_2$), но известным параметром $\gamma = \frac{\alpha_2(t)}{\alpha_1(t)}$.

Аналогично способу 4а получим :

идентичных датчиков с разными мгновенными мощностями нагрева.

Из выражения вида 2 для двух датчиков получим решение :

Недостатки : необходимость обеспечения идентичности и знания

конструктивных параметров датчиков.

Способ 5б

Использование двух активных разных датчиков с разными мгновен-

ными мощностями нагрева и известным параметром $\gamma = \frac{\alpha_2(t)}{\alpha_1(t)}$.

Аналогично вышеприведенному получим :

$$\theta_c(t) = \frac{\theta_1(t)S_1[P_2(t) - m_2c_2\theta'_2(t)] - \theta_2(t)S_2\gamma[P_1(t) - m_1c_1\theta'_1(t)]}{S_1[P_2(t) - m_2c_2\theta'_2(t)] - S_2\gamma[P_1(t) - m_1c_1\theta'_1(t)]}, \quad (41)$$

$$\alpha_1(t) = \frac{(S_2\gamma)^{-1}[P_2(t) - m_2c_2\theta'_2(t)] - S_1^{-1}[P_1(t) - m_1c_1\theta'_1(t)]}{\theta_2(t) - \theta_1(t)}. \quad (42)$$

Недостатки : необходимость знания конструктивных параметров датчиков и параметра γ .

$\gamma = 1$, т.е. $\alpha_1(t) = \alpha_2(t)$ при $S_1 = S_2 = S$.

Способ 5в

Аналогичен способу 5б при

Получим :

$$\theta_c(t) = \frac{\theta_1(t)[P_2(t) - m_2c_2\theta'_2(t)] - \theta_2(t)[P_1(t) - m_1c_1\theta'_1(t)]}{[P_2(t) - m_2c_2\theta'_2(t)] - [P_1(t) - m_1c_1\theta'_1(t)]}, \quad (43)$$

$$\alpha(t) = \frac{[P_2(t) - m_2c_2\theta'_2(t)] - [P_1(t) - m_1c_1\theta'_1(t)]}{S[\theta_2(t) - \theta_1(t)]}. \quad (44)$$

Недостатки : необходимость знания конструктивных параметров датчиков.

ем двух последовательных отсчетов температуры датчиков за время, в течение которого параметры среды не изменятся.

Способ 5г

Использование двух активных идентичных датчиков с разными мгновенными мощностями нагрева (аналогично способу 5а) и накоплени-

Из выражения 40 для двух последовательных отсчетов можем записать

$$\begin{cases} \alpha(1) S[\theta_1(1) - \theta_2(1)] + mc[\theta'_1(1) - \theta'_2(1)] = P_1(1) - P_2(1), \\ \alpha(2) S[\theta_1(2) - \theta_2(2)] + mc[\theta'_1(2) - \theta'_2(2)] = P_1(2) - P_2(2). \end{cases} \quad (45)$$

Если $\alpha(1) = \alpha(2) = \alpha(1,2)$, то решая систему уравнений относительно $\alpha(1,2)$ и mc получим :

$$S\alpha(1,2) = \frac{[P_1(1) - P_2(1)][\theta'_1(2) - \theta'_2(2)] - [P_1(2) - P_2(2)][\theta'_1(1) - \theta'_2(1)]}{[\theta_1(1) - \theta_2(1)][\theta'_1(2) - \theta'_2(2)] - [\theta_1(2) - \theta_2(2)][\theta'_1(1) - \theta'_2(1)]}, \quad (46)$$

$$mc = \frac{[P_1(2) - P_2(2)][\theta_1(1) - \theta_2(1)] - [P_1(1) - P_2(1)][\theta_1(2) - \theta_2(2)]}{[\theta_1(1) - \theta_2(1)][\theta'_1(2) - \theta'_2(2)] - [\theta_1(2) - \theta_2(2)][\theta'_1(1) - \theta'_2(1)]}. \quad (47)$$

Подставляя значение mc из 47 в выражение 39 получим выражение для температуры среды $\theta_c(1) = \theta_c(2) = \theta_c(1,2)$, в котором от-

сутствует конструктивный параметр датчика mc .

Недостатки : необходимость "быстрого" изменения нагрева датчи-

ков и относительно большой объем данных.

Способ 5д

Использование двух активных разных датчиков с разными мгновенными мощностями нагрева и известным параметром γ (аналогично

$$\begin{cases} \alpha(1,2,3) S_1 [\theta_2(1) - \theta_1(1)] - m_1 c_1 \theta_1'(1) + m_2 c_2 \theta_2'(1) \gamma_1 = P_2(1) \gamma_1 - P_1(1), \\ \alpha(1,2,3) S_1 [\theta_2(2) - \theta_1(2)] - m_1 c_1 \theta_1'(2) + m_2 c_2 \theta_2'(2) \gamma_1 = P_2(2) \gamma_1 - P_1(2), \\ \alpha(1,2,3) S_1 [\theta_2(3) - \theta_1(3)] - m_1 c_1 \theta_1'(3) + m_2 c_2 \theta_2'(3) \gamma_1 = P_2(3) \gamma_1 - P_1(3). \end{cases} \quad (48)$$

где

$$\alpha(1) = \alpha(2) = \alpha(3) = \alpha(1,2,3); \quad \gamma_1 = \gamma S_2^{-1} S_1.$$

Система 48 решается относительно коэффициента теплоотдачи $\alpha(1,2,3)$ и параметров датчиков $m_1 c_1$ и $m_2 c_2$. Параметры датчиков $m_1 c_1$ и $m_2 c_2$ подставляются в выражение 41 и находится температура окружающей среды $\theta_c(1) = \theta_c(2) = \theta_c(3) = \theta_c(1,2,3)$ независимо от конструктивных параметров датчиков за исключением S_1 и S_2 (соответственно d_1 и d_2 , γ и

$$\begin{cases} \alpha(1,2,3) S [\theta_2(1) - \theta_1(1)] - m_1 c_1 \theta_1'(1) + m_2 c_2 \theta_2'(1) = P_2(1) - P_1(1), \\ \alpha(1,2,3) S [\theta_2(2) - \theta_1(2)] - m_1 c_1 \theta_1'(2) + m_2 c_2 \theta_2'(2) = P_2(2) - P_1(2), \\ \alpha(1,2,3) S [\theta_2(3) - \theta_1(3)] - m_1 c_1 \theta_1'(3) + m_2 c_2 \theta_2'(3) = P_2(3) - P_1(3). \end{cases} \quad (49)$$

Решаем систему относительно неизвестных $\alpha(1,2,3)$; $m_1 c_1$; $m_2 c_2$. Подставляем значения $m_1 c_1$ и $m_2 c_2$ в уравнение 42 и находим значение температуры окружающей среды $\theta_c(1) = \theta_c(2) = \theta_c(3) = \theta_c(1,2,3)$ независимо от конструктивных параметров датчиков $m_1 c_1$ и $m_2 c_2$.

Недостатки : необходимость "быстрого" изменения нагрева датчиков и знания S .

способу 5б) и накоплением трех последовательных отсчетов температуры датчиков при неизменности параметров среды.

Из уравнения 42 для трех последовательных отсчетов получим систему уравнений :

γ_1). Таким образом, конструктивные параметры датчиков $m_1 c_1$ и $m_2 c_2$ не влияют на результат измерения. Недостатки : необходимость "быстрого" изменения нагрева датчиков и знания γ и γ_1 .

Способ 5е

Способ 5д при $S_1 = S_2 = S$ и $\alpha_1(t) = \alpha_2(t)$.

Из уравнения 48 для трех последовательных отсчетов получим :

Результаты проведенного выше анализа сведены в таблицу 1, из которой можно сделать следующие выводы :

- для определения коэффициента теплоотдачи α площадь поверхности S датчика должна быть известна или определяется их произведение $\alpha_1 S$;
- коэффициент теплоотдачи не определяется одним пассивным датчком в рабочем режиме;
- температура среды и коэффициент теплоотдачи одновременно за один отсчет (в любой момент времени) определяются только двумя датчиками

(пассивными или активными) и только при известных параметрах датчиков m_1c_1 и m_2c_2 ;

- при неизвестных параметрах датчиков (mc) температура среды, коэффициент теплоотдачи и параметры датчиков определяются за два отсчета для двух датчиков или за три отсчета для одного активного или двух пассивных и активных датчиков при запрете на изменчивость среды за время этих отсчетов;
- поскольку конструктивные параметры датчиков mc (теплоемкость на единицу длины) достаточно консервативны, то их можно определять редко, используя для этого по два-три отсчета, а затем работать в режиме одного отсчета по двум датчикам;
- из экономических соображений целесообразно использовать идентичные по mc датчики в пределах технологической точности, что возможно в способе 5а с двумя активными датчиками;
- с повышением требований по точности идентичность датчиков по mc не будет обеспечена и их идентификация может быть выполнена по способу 5с за три отсчета, а работа с определе-

нием α и θ_c осуществляется по способу 5в за один отсчет.

Определение профиля скорости потока

Рассмотренные выше способы измерения с помощью распределенных термопрофиломеров позволяют получить "мгновенные" профили температуры среды $\theta_c(t)$ и коэффициента теплоотдачи $\alpha(t)$. Последнее через выражение 10 или через градуировочную характеристику для конкретного датчика дает профиль модуля скорости потока $v(z,t) = \varphi[\alpha(z,t)]$ с учетом диаграммы направленности распределенного датчика.

Известно [2], что для цилиндрического датчика диаграмма направленности по скорости обтекания через коэффициент теплоотдачи в плоскости оси z имеет эллипсоидальный вид (рис.2а) и вид окружности в поперечной плоскости (рис.2б).

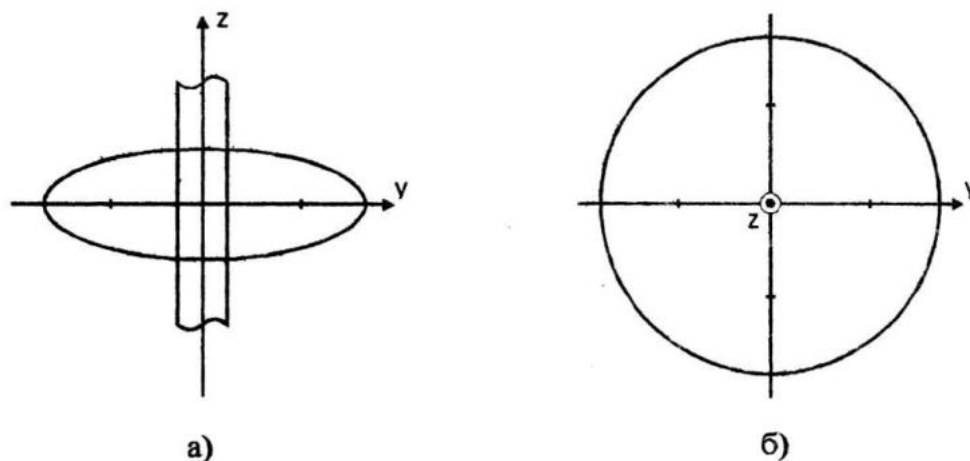


Рис.2 Диаграмма распределенного датчика по скорости потока через коэффициент теплоотдачи в продольной (а) и поперечной (б) плоскости

Имеется много объектов (водоводы, каналы, реки, струйные

течения), в которых превалирует или представляет интерес горизонтальная

составляющая вектора скорости потока. В этих случаях использование распределенных датчиков термопрофилемеров позволяет прямо получить профиль $\alpha(z, t)$ и далее профиль модуля вектора мгновенной скорости потока при вертикальном положении датчика или с коррекцией по диаграмме направленности при наклонном положении датчика.

Диаграммы направленности распределенных датчиков термопрофилемеров могут быть сформированы внешним ограждением. Для примера на рис.3 показаны схемы внешнего трубчатого ограждения для формирования локальных косинусных диаграмм направленности в продольной (а) и поперечной (б) плоскостях.

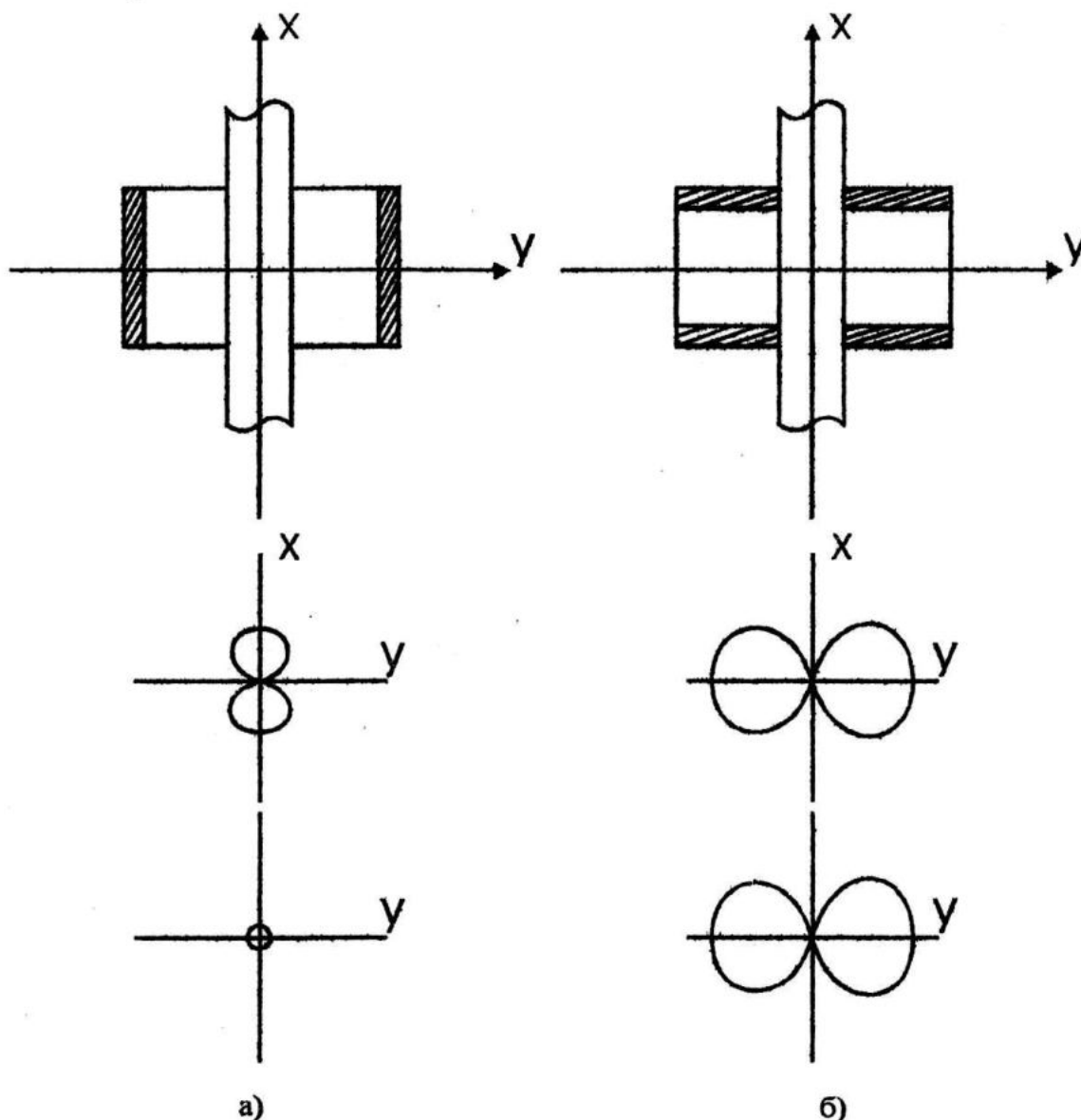


Рис.3 Внешние ограждения распределенного датчика термопрофилемера и соответствующие им диаграммы направленности по скорости через коэффициент теплоотдачи в продольной (а) и поперечной (б) плоскостях

Можно представить конструкцию (хотя и громоздкую) с подобными ограждениями, которая для многих объектов позволит измерить профили ортогональных составляющих вектора мгновенной скорости течения.

Другие возможности по определению профиля скорости течения заложены в изменении профиля температуры среды $\theta_c(z, t)$ во времени. Прежде всего продольная (вдоль оси z) локальная (на участке оси) со-

ставляющая мгновенной скорости потока $v_z(z, t)$ может быть определена по смещению изотерм вдоль оси z во времени [9]. Например, если значения температуры в соседних точках z_1 и z_2 в соседние моменты времени t_1 и t_2 составляют $\theta(z_1, t_1)$, $\theta(z_2, t_2)$ и $\theta(z_1, t_2)$, $\theta(z_2, t_1)$, то значение локальной мгновенной продольной скорости $v_z(z_2, t_2)$ при линейной интерполяции можно определить по формуле

$$v_z(z_2, t_2) = \frac{z_2 - z_1}{t_2 - t_1} \left[\frac{\theta_{\text{из}} - \theta(z_1, t_2)}{\theta(z_2, t_2) - \theta(z_1, t_1)} - \frac{1}{2} \right], \quad (50)$$

где $\theta_{\text{из}} = \frac{\theta(z_1, t_1) - \theta(z_2, t_1)}{2}$.

Диаграмма направленности распределенного датчика по течению через продольное смещение изотерм является косинусной (рис.4). Из нескольких датчиков можно формировать антенные решетки для определения разных проекции вектор скорости потока на оси датчиков.

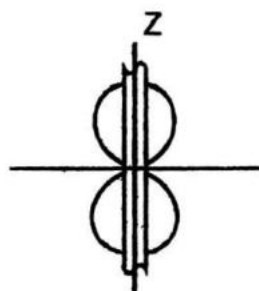


Рис.4 Диаграмма направленности распределенного датчика по скорости потока через смещение изотерм

На рис.5 показаны примеры различных антенных решеток из распределенных датчиков термопрофилеметров. Поскольку для определенного

объема среды можно найти три по разному ориентированных оси между пространственно - разнесенными участками датчика, то для этого объема среды имеется возможность определить три различных проекции вектора мгновенной скорости потока. Пространственное разрешение по скорости потока будет зависеть от пространственного разрешения по температуре как вдоль оси датчика, так и расстояния между датчиками.

Совокупность заданных в пространстве точек, температура в которых определяется в любой момент времени, позволяет использовать известные и хорошо развитые корреляционные и спектрально-фазовые методы определения составляющих вектора средней скорости [10,11].

Таким образом, распределенные термопрофилеметры позволяют измерять не только профиль мгновенной температуры, а и профиль вектора мгновенной или средней скорости потока.

Таблица 1

Способы измерения температуры среды и коэффициента теплоотдачи одним и двумя пассивными и активными датчиками

№ сл.	Состав датчиков и воздействия	инд.	Условия для параметров и воздействий	Условия для данных	Число отсчетов	Набор данных	Набор параметров	Результат
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	1 пассивный m, S	а	$\alpha(t) = \text{const}$ $T = \text{const}$		1	$\theta(t)$ $\theta'(t)$	$T = \frac{mC}{\alpha S}$	$\theta_c(t)$
		б	спец. тактор.	$\theta'(\tau) = 0$	асинхр.	$\theta(t)$ $\theta'(t)$	-	$\theta_c(\tau)$
2.	1 активный $m, S, P(t)$	а	$P(T)$	$\theta_c(1) = \theta_c(2)$ $\alpha(1) = \alpha(2)$	2	$\theta(1), \theta(2)$ $\theta'(1), \theta'(2)$ $P(1), P(2)$	m, S	$\theta_c(1,2)$ $\alpha(1,2)$
				$\theta_c(1) = \theta_c(2) = \theta_c(3)$ $\alpha(1) = \alpha(2) = \alpha(3)$	3	$\theta(1), \theta(2), \theta(3)$ $\theta'(1), \theta'(2), \theta'(3)$ $P(1), P(2), P(3)$	S	$\theta_c(1,2,3)$ $\alpha(1,2,3)$ m, S
		в	$P(t) = P_0 + \tilde{P}(t)$	$\theta'(\tau) = 0$	2	$\theta(1), \theta(2)$ $P(1), P(2)$	S	$\theta_c(1,2)$ $\alpha(1,2)$
				3	$\theta(1), \theta(2), \theta(3)$ $P(1), P(2), P(3)$	$\theta_c(1,2)$ $\alpha(1,2)$ T, m, S		
д	$\text{var} [\pm P(t)]$	$m, S, \theta'(t) = P(t)$	1	$\theta(t)$ $\theta'(t)$	m, S	$\theta_c(t) = \theta(t)$		

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
3.	2 пассивных $m_1 c_1, S_1$ $m_2 c_2, S_2$	а	$T_1(1) = T_1(2)$ $T_2(1) = T_2(2)$	$\alpha_1(1) = \alpha_1(2)$ $\alpha_1(1) = \alpha_2(2)$	2	$\theta_1(1), \theta_1(2)$ $\theta_1'(1), \theta_1'(2)$ $\theta_2(1), \theta_2(2)$ $\theta_2'(1), \theta_2'(2)$	$m_1 c_1, S_1$ $m_2 c_2, S_2$	$\theta_c(1), \theta_c(2)$ $\alpha_1(1,2), \alpha_2(1,2)$
		б	$m_1 c_1 \neq m_2 c_2$ $S_1 = S_2$ $d_1 = d_2$ $\alpha_1 = \alpha_2$	-	1	$\theta_1(t), \theta_1'(t)$ $\theta_2(t), \theta_2'(t)$	$m_1 c_1, m_2 c_2, S$	$\theta_c(t)$ $\alpha(t)$
		в	$m_1 c_1 \neq m_2 c_2$ $S_1 \neq S_2$ $\gamma = \frac{\alpha_1(t)}{\alpha_2(t)}$	-			$m_1 c_1, m_2 c_2$ S_1, S_2 γ	$\theta_c(t)$ $\alpha(t)$
4.	1 пассивный $m_1 c_1, S_1$ 1 активный $m_2 c_2, S_2, P(t)$	а	$m_1 c_1 = m_2 c_2 = mc$ $S_1 = S_2 = S$	-	1	$\theta_1(t), \theta_1'(t)$ $\theta_2(t), \theta_2'(t)$ $P(t)$	mc, S	$\theta_c(t)$ $\alpha(t)$
		б	Рег. $P(t)$ по условию $\theta_2(t) - \theta_1(t) = const$	-				$\theta_c(t)$ $\alpha(t)$
		в	$m_1 c_1 \neq m_2 c_2$ $d_1 \neq d_2$ $S_1 \neq S_2$ $\gamma = \frac{\alpha_1(t)}{\alpha_2(t)}$	-			$m_1 c_1, S_1$ $m_2 c_2, S_2$ γ	$\theta_c(t)$ $\alpha_1(t)$ $\alpha_2(t)$

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9			
5.	2 активных $m_1c_1, S_1, P_1(t)$ $m_2c_2, S_2, P_2(t)$	а	$m_1c_1 = m_2c_2 = mc$ $S_1 = S_2 = S$ $P_1(t) \neq P_2(t)$	-	1	$\theta_1(t), \theta_1'(t)$ $\theta_2(t), \theta_2'(t)$ $P_1(t), P_2(t)$	mc, S	$\theta_c(t)$ $\alpha(t)$			
			б	$m_1c_1 \neq m_2c_2$ $S_1 \neq S_2, \gamma = \frac{\alpha_1(t)}{\alpha_2(t)}$ $P_1(t) \neq P_2(t)$	-					m_1c_1, m_2c_2 S_1, S_2 γ	$\theta_c(t)$ $\alpha(t)$
				в	$m_1c_1 \neq m_2c_2$ $S_1 = S_2 = S$				-		m_1c_1, m_2c_2 S
		г		$m_1c_1 = m_2c_2 = mc$ $S_1 = S_2 = S$ $P_1(t) \neq P_2(t)$	$\theta_c(1) = \theta_c(2)$ $\alpha(1) = \alpha(2)$	2	$\theta_1(0), \theta_1(2)$ $\theta_1'(0), \theta_1'(2)$ $\theta_2(0), \theta_2(2)$ $\theta_2'(0), \theta_2'(2)$ $P_1(0), P_1(2)$ $P_2(0), P_2(2)$	S	mc $\theta_c(1,2)$ $\alpha(1,2)$		
				д	$m_1c_1 \neq m_2c_2$ $S_1 \neq S_2, \gamma = \frac{\alpha_1(t)}{\alpha_2(t)}$ $P_1(t) \neq P_2(t)$ $\gamma_1 = \gamma S_2^{-1} S_1$	$\theta_c(1) = \theta_c(2) = \theta_c(3)$ $\alpha(1) = \alpha(2) = \alpha(3)$				3	$\theta_1(0), \theta_1(2), \theta_1(3)$ $\theta_1'(0), \theta_1'(2), \theta_1'(3)$ $\theta_2(0), \theta_2(2), \theta_2(3)$ $\theta_2'(0), \theta_2'(2), \theta_2'(3)$ $P_1(0), P_1(2), P_1(3)$ $P_2(0), P_2(2), P_2(3)$
		е	$m_1c_1 \neq m_2c_2$ $S_1 = S_2 = S$ $P_1(t) = P_2(t)$	$\theta_c(1) = \theta_c(2) = \theta_c(3)$ $\alpha(1) = \alpha(2) = \alpha(3)$	3	S	m_1c_1, m_2c_2 $\theta_c(1,2,3)$ $\alpha(1,2,3)$				

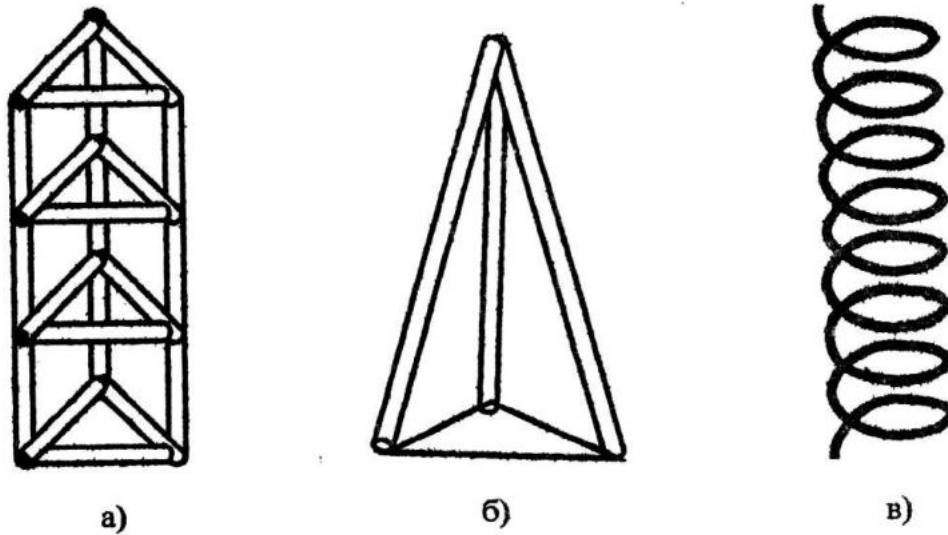


Рис.5 Антенные решетки из распределенных датчиков термопрофилемеров призматической (а), пирамидальной (б), спиралевидной (в) форм для определения составляющих вектора скорости потока

ЛИТЕРАТУРА

1. Коротков П.А., Лондон Г.Е. Динамические контактные измерения тепловых величин // - Л.: Машиностроение (Ленингр. отд.), 1974, - 224с.
2. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин : (Измерительные преобразователи) // Учебн.пособие для вузов. - Л.: Энергоатомиздат (Ленингр. отд.), 1983, - 320с.,ил.
3. Кондратьев Г.М. Тепловые измерения // М.-Л.: Машгиз, 1975, - 221с.
4. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена // М.-Л.: Машгиз, 1957, - 383с.
5. Иванов А.Ф. Алгоритм коррекции динамических погрешностей данных измерений температуры при параболической аппроксимации выходного сигнала датчика методом наименьших квадратов // Сб. тр. МНТК "Системы контроля окружающей среды", - Севастополь, 1998.
6. Гайский В.А. Способ исключения динамической погрешности первичного измерительного преобразователя при сканировании поля // Сб. тр. МНТК "Автоматизированные системы контроля состояния морской среды", - Севастополь, 1992.
7. Азизов А.М., Гордов А.Н. Точность измерительных преобразователей // - Л.: Энергия, 1975, - 256с.
8. Температурные измерения. Справочник / Геращенко О.А., Гордов А.Н., Еремина А.К. и др.; АН УССР, Ин-т проблем энергосбережения, - Киев : Наук. думка, 1989, - 704с.
9. Гайский В.А., Гасийкий П.В. Распределенные термопрофилемеры и их возможности использования в океанографических исследованиях // Морской гидрофизический журнал, - Севастополь, №6, 1999.
10. Козубовский С.Ф. Корреляционные экстремальные системы // - Киев : Наук. думка, 1973, - 223с.
11. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях // в 2-х томах, Пер. с франц., - М.: Мир, т.1, 1983, - 312с.