

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ГРАНИЦ РАЗДЕЛА СРЕД С ПОМОЩЬЮ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ТЕРМОПРОФИЛЕМЕРОВ

В.А.Гайский, П.В.Гайский

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

Рассматриваются способы определения положения границ раздела сред, в том числе уровня жидкости, по измеренному с помощью распределенных термопрофилемеров профилю теплообмена датчика со средой.

Задачи измерения границ раздела газообразных, жидких и многослойных сред встречаются во многих областях. В частности в океанологии задача точного и надежного измерения уровня моря остается актуальной. Известны способы определения уровня жидкости на основе различия коэффициентов теплообмена датчиков температуры с газом и жидкостью [1, 2]. В этих способах обычно используется два распределенных терморезисторных датчика температуры, пересекающих границу раздела, находящихся в разных тепловых режимах за счет подогрева одного из датчиков и

включенных в смежные плечи измерительного моста для получения сигнала, зависящего от положения уровня жидкости.

Недостатком этих способов является ограниченная точность из-за зависимости результата измерения от физических свойств сред (теплоемкости, плотности, теплопроводности и скорости обтекания терморезисторов) и их профилей вдоль терморезисторов. Кроме того, в этих способах не обеспечивается определение положения нескольких границ раздела в слоистых средах.

Новое решение этой задачи возможно при использовании распределенных термопрофилемеров. Датчики распределенных термопрофилемеров содержат параллельно уложенные распределенные терморезисторы с погонной термо чувствительностью, модулированной по функциям ортогонального базиса (например, функциям Уолша) [4]. Термопрофилемеры измеряют профиль температуры среды вдоль датчика $\theta_c(z, t)$. Для определения положения границ раздела сред можно использовать один или два термопрофилемера, которые устанавливаются в сечении через границы раздела. При использовании двух термопрофилемеров один из них подогревается погонной мощностью $P(z, t)$. Для него справедливо уравнение теплового баланса

$$P(z, t) = [\theta_1(z, t) - \theta_c(z, t)]\alpha(z, t)S + mc \frac{\partial \theta_1(z, t)}{\partial t}, \quad (1)$$

где $\theta_1(z, t)$ – текущая температура датчика; $\theta_c(z, t)$ – текущий профиль температуры среды вдоль датчика;

m – погонная масса датчика;

C – удельная теплоемкость материала датчика;

S – погонная площадь внешней поверхности;

$\alpha(z, t)$ – погонный текущий коэффициент теплообмена.

Для не подогреваемого второго датчика с идентичными конструктивными параметрами m, C, S справедливо

$$[\theta_2(z, t) - \theta_c(z, t)]\alpha(z, t)S + mc \frac{\partial \theta_2(z, t)}{\partial t} = 0. \quad (2)$$

Из этих уравнений можем записать для профиля коэффициента теплообмена

$$\alpha(z, t) = \frac{P(z, t) - mc \left[\frac{\partial \theta_1(z, t)}{\partial t} - \frac{\partial \theta_2(z, t)}{\partial t} \right]}{S[\theta_1(z, t) - \theta_2(z, t)]}. \quad (3)$$

В стационарном режиме при

$$\frac{\partial \theta_1(z, t)}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial \theta_2(z, t)}{\partial t} = 0,$$

$$P(z, t) = const = P(z)$$

получим

$$\alpha(z, t) = \frac{P(z, t)S^{-1}}{\theta_1(z, t) - \theta_2(z, t)}. \quad (4)$$

Таким образом, в стационарном режиме нагрева и неизменного состояния среды (при неизменном профиле температуры и профилях её других физических свойств) профиль коэффициента теплообмена $\alpha(z, t)$, нормированный на S , однозначно определяется разностью профилей температур датчиков. Понятна условность стационарного состояния. Коэффициент теплообмена α датчика со средой зависит от физических свойств и состояния среды (теплопроводности, теплоемкости, плотности, кинетической вязкости, скорости и режима обтекания датчика), поэтому в разных средах он имеет разные значения и на границах раздела сред претерпевает резкие изменения [5]. Поэтому положения границ раздела сред z_m будут соответствовать положениям экстремумов на профиле градиента коэффициента теплообмена $\partial\alpha(z, t)/\partial z$.

Для измерителя уровня жидкости для примера на рис. 1 показаны текущие профили температур нагретого $\theta_1(z, t)$ и не нагретого $\theta_2(z, t)$ датчиков, на рис. 2 – профиль разности этих температур $\Delta\theta(z, t)$ на рис. 3 – профиль коэффициента теплообмена $\alpha(z, t)$, а его пространственного градиента – на рис. 4.

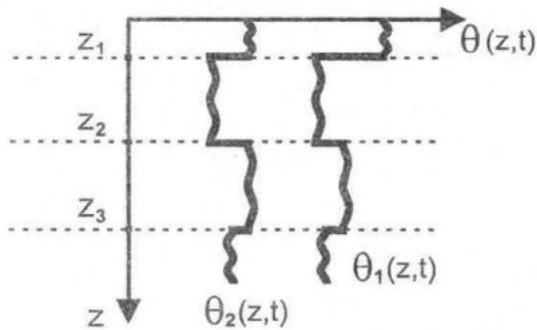


Рис. 1 – Текущие профили температуры двух датчиков

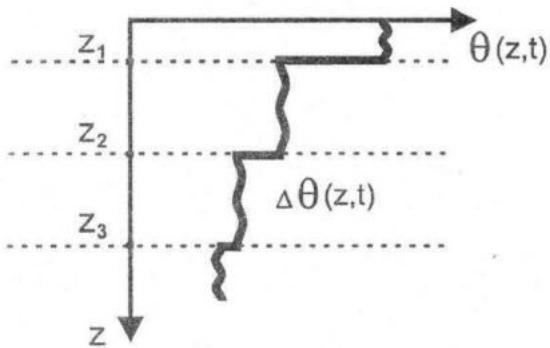


Рис. 2 – Профиль разности температур двух датчиков

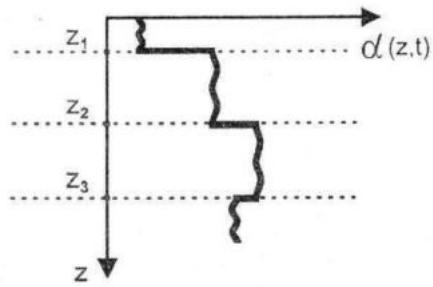


Рис. 3 – Профиль коэффициента теплообмена

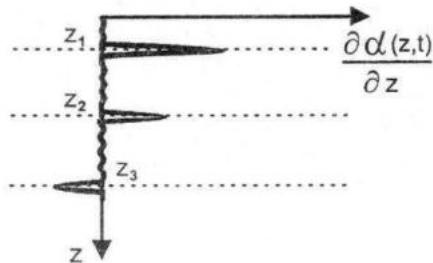


Рис. 4 – Профиль пространственного градиента коэффициента теплообмена

На рис. 5 показан пример размещение датчиков для определения положения границ раздела в четырехслойной среде. На рис. 6 – профили температур $\theta_1(z, t)$ и $\theta_2(z, t)$ датчиков, на рис. 7 – профиль разности температур датчиков $\Delta\theta(z, t)$, на рис. 8 – профиль коэффициента теплообмена $\alpha(z, t)$, на рис. 9 – профиль пространственного градиента коэффициента теплообмена $\partial\alpha(z, t)/\partial z$.

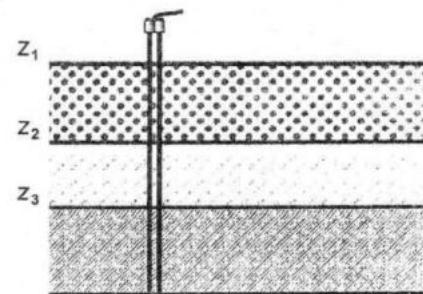


Рис. 5 – Размещение датчиков двух термопрофилемеров

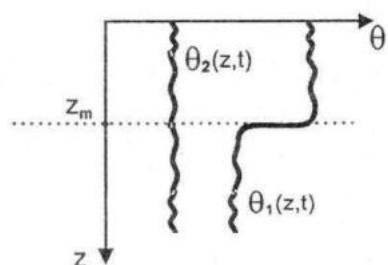


Рис. 6 – Профили температур двух датчиков

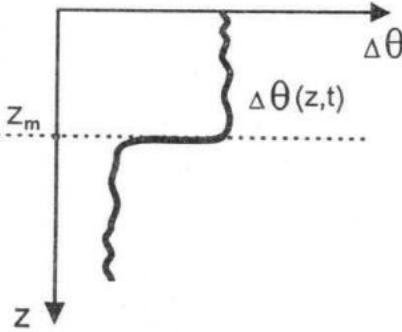


Рис. 7 – Профиль разности температур двух датчиков

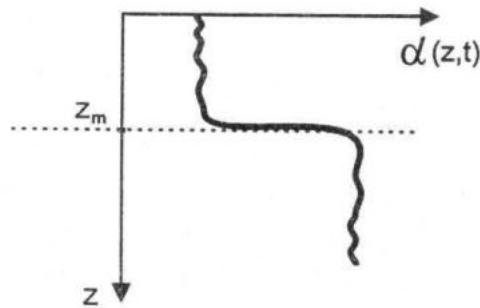


Рис. 8 – Профиль коэффициента теплообмена

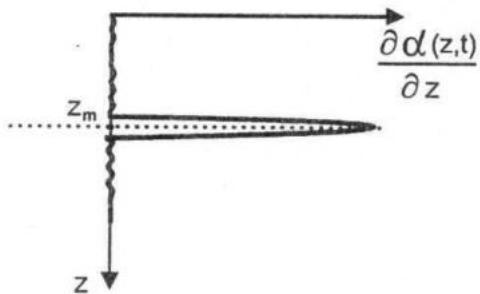


Рис. 9 – Профиль пространственного градиента коэффициента теплообмена

Из приведенных рисунков видно, что максимумы пространственного градиента коэффициента теплообмена распределенных датчиков со средой соответствуют границам раздела сред, в том числе – уровню жидкости [6].

Текущий профиль температуры среды $\theta_c(z, t)$ может быть также получен по формуле

$$\theta_c(z, t) = \theta_2(z, t) + \frac{mc}{\alpha(z, t)} \frac{\partial \theta_2(z, t)}{\partial t}. \quad (5)$$

Возможен вариант определения положения границ раздела с использованием одного термопрофилемера с динамическим режимом нагрева.

Если можно принять, что конструктивные параметры датчика mc и S известны и постоянны, профиль температуры среды $\theta_1(z, t)$ и ее физические свойства не изменяются существенно за несколько (не менее трех) отсчетов профиля температуры датчика, т.е.

$$\begin{aligned} \theta_c(z, t) &= \theta_c(z, t_i) \approx \theta_c(z, t_{i+1}) \approx \theta_c(z, t_{i+2}); \\ \alpha(z, t) &= \alpha(z, t_i) \approx \alpha(z, t_{i+1}) \approx \alpha(z, t_{i+2}). \end{aligned} \quad (6)$$

то для выражения (1) можем записать

$$P(z, t) = \theta(z, t) \alpha(z, t) S - \theta_c(z, t) \alpha(z, t) S + mc \frac{\partial \theta(z, t)}{\partial t}, \quad (7)$$

Для моментов времени t_i и t_{i+1} получим

$$\begin{aligned} P(t_i) &= \theta(z, t_i) \alpha(z, t) S - \theta_c(z, t_i) \alpha(z, t) S + mc \frac{\partial \theta(z, t_i)}{\partial t} \\ P(t_{i+1}) &= \theta(z, t_{i+1}) \alpha(z, t) S - \theta_c(z, t_{i+1}) \alpha(z, t) S + mc \frac{\partial \theta(z, t_{i+1})}{\partial t}. \end{aligned} \quad (8)$$

Из решения системы уравнений (8) получим

$$\alpha(z, t) = \frac{P(t_i) - P(t_{i+1}) - mc \left[\frac{\partial \theta(z, t_i)}{\partial t} - \frac{\partial \theta(z, t_{i+1})}{\partial t} \right]}{S [\theta(z, t_i) - \theta(z, t_{i+1})]}. \quad (9)$$

Для профиля температуры среды $\theta_c(z,t)$ получим

$$\theta_c(z,t) = \frac{[\theta(z,t_i) + \theta(z,t_{i+1})]\alpha(z)S - [P(t_i) + P(t_{i+1})] + mc \left[\frac{\partial \theta(z,t_i)}{\partial t} + \frac{\partial \theta(z,t_{i+1})}{\partial t} \right]}{2\alpha(z,t)S}. \quad (10)$$

В общем случае моменты времени t_i и t_{i+1} произвольны, но условие постоянства $\theta_c(z)$ и $\alpha(z,t)$ за время измерений налагает требование их близости. Это же требование вытекает из необходимости корректного вычисления производных по температуре.

С другой стороны, для корректного вычисления $\alpha(z)$ по выражению (9) желательно, чтобы профили температуры датчика $\theta(z,t_i)$ и $\theta(z,t_{i+1})$ различались как можно больше. Поскольку разнесение t_i и t_{i+1} не желательно, то это может быть обеспечено снижением постоянной термической инерции датчика при одновременном увеличении изменчивости мощности нагрева $P(t)$.

Таким образом, реализация динамического режима нагрева датчика с большей

изменчивостью во времени, чем изменчивость внешней среды по температуре и коэффициенту теплообмена, может обеспечить измерение с помощью одного термопрофилемера как профиля коэффициента теплообмена датчика со средой, так и профиля температуры среды.

Число контролируемых параметров уменьшается и вычисления упрощаются при нагреве датчика периодической последовательностью импульсов тока так, как это показано на рис. 10а. После прекращения нагрева, на участке свободного охлаждения датчика, когда $P(t_i) = P(t_{i+1}) = 0$ (рис. 10б) из уравнения (9) для профиля коэффициента теплообмена можем записать

$$\alpha(z,t) = \frac{mc \left[\frac{\partial \theta(z,t_i)}{\partial t} - \frac{\partial \theta(z,t_{i+1})}{\partial t} \right]}{S [\theta(z,t_i) - \theta(z,t_{i+1})]}. \quad (11)$$

Для профиля температуры среды получим

$$\theta_c(z,t) = \frac{\theta(z,t_i)\theta'(z,t_{i+1}) - \theta(z,t_{i+1})\theta'(z,t_i)}{\theta'(z,t_{i+1}) - \theta'(z,t_i)}. \quad (12)$$

Замечательным свойством выражения (12) является полная независимость результата измерения температуры среды от параметров датчика mc и S .

Отметим, что полученные выражения справедливы для нитевидных датчиков, диаметр которых достаточно мал, чтобы можно было бы пренебречь временами рас-

пространения температурных волн и временами вхождения датчика в «регулярный режим» при динамическом нагреве и охлаждении.

Когда этими факторами нельзя пренебречь для обеспечения необходимой точности измерений, необходимо проведение дополнительного анализа.

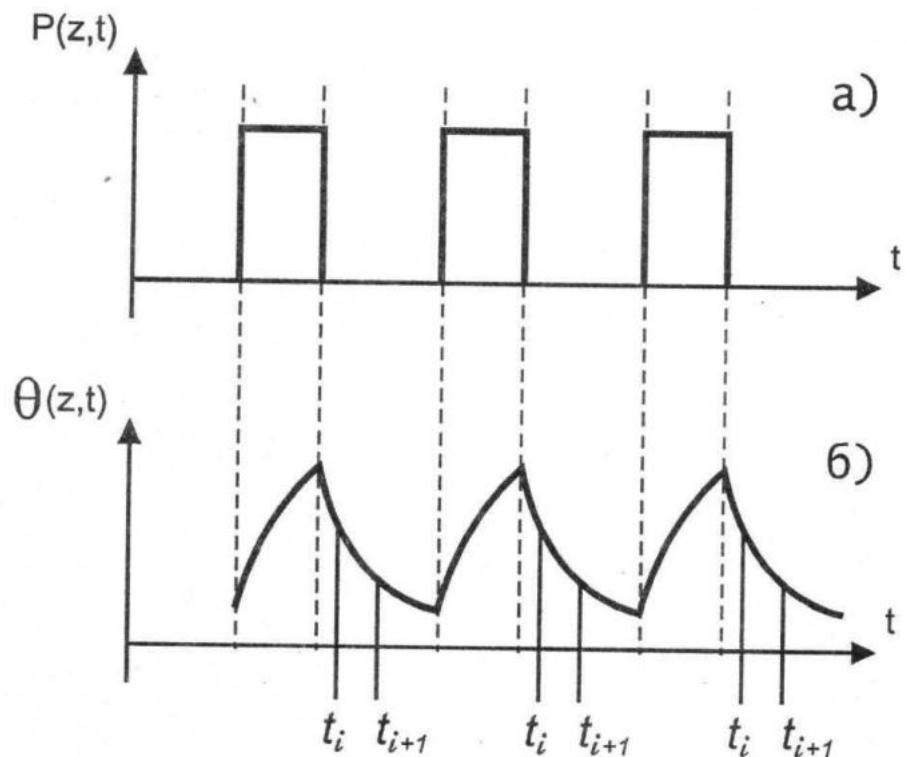


Рис. 10 – Графики сигналов нагрева (а) и температуры датчика (б)

ЛИТЕРАТУРА

1. Разработка и исследование новых уровнемеров с тепловыми распределенными параметрами. – В к.: Теория информационных систем и устройств с распределенными параметрами. Уфа, 1974, ч. II, с. 157-158. Авт. Р.К.Азимов, С.П.Колмыков, Р.М.Курбанова, А.Азимов, А.Суслов, А.А.Нанбаев, А.М.Исмаилов.
2. А.С. № 263922 (СССР). Уровнемер для жидкости, авт. Рудный Н.М., Рудная А.И., Савелов В.Ф., опубл. в бюл. «Открытия. Изобретения. Пром. образцы. Товарные знаки», 1970, № 8, - С. 99.
3. Гайский В.А., Гайский П.В. Распределенные термопрофилемеры и их возможности в океанографических исследованиях. МГФЖ № 6, 1996.

4. А.С. № 1673857 (СССР). Датчик уровня жидкости, авт. Г.А.Франк, Ю.И.Гладков, А.Б.Игошин, С.В.Гомбиков, опубл. в бюл. Открытия. Изобретения., 1991, № 32.

5. Сэлбси Г., Брэдшоу П. Конвективный теплообмен. Физические основы и вычислительные методы. Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 592 с.

6. Патент України № 58633. Спосіб визначення положення меж розподілу середовищ. В.О.Гайський, П.В.Гайський - Опуб. 15.08.2003, Бюл. № 8.

7. Патент України № 67847. Спосіб визначення положення меж розподілу середовищ. В.О.Гайський, П.В.Гайський - Опуб. 15.07.2004, Бюл. № 7.