

*Д.Э. Болтенко, Н.Н. Кирич, Э.А. Болтенко, В.П. Шаров*

Федеральное государственное унитарное предприятие Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности атомных электростанций ФГУП «ЭНИЦ», Московская обл., Россия

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОФАЗНЫХ ПОТОКОВ МЕТОДОМ ТЕПЛООВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

### АННОТАЦИЯ

В докладе представлены результаты исследований метода теплового зондирования с помощью термопары с прямым нагревом чувствительного элемента (термопарный измеритель скорости - ТИС). Приведена функциональная зависимость перепада температур на чувствительном элементе ТИС от скорости потока.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Для диагностики одно- и двухфазных потоков может быть использован метод теплового зондирования. В этом методе измеряется зависящий от скорости эффект теплового воздействия на тело, контактирующее с потоком. Наиболее известный метод, реализующий тепловое зондирование потока, – метод термоанемометрии [1]. Термоанемометр позволяет получить информацию как о скорости потока, так и ее флуктуациях. В силу ряда ограничений [1] метод теплового зондирования с помощью термоанемометра используется в основном для диагностики газовых потоков. Для жидкостей метод термоанемометрии практически не используется. Известен метод теплового зондирования [2], в котором в качестве чувствительного элемента используется спай термопары, нагрев которой осуществляется прямым либо косвенным способом. Метод прямого

нагрева чувствительного элемента обладает рядом преимуществ по сравнению с методом косвенного нагрева. Отсутствие тепло- и электроизоляции снимает основное ограничение по рабочей температуре датчика. Малая масса спая и возможность выделения большого количества тепла за малый промежуток времени позволяет применить метод прямого нагрева для измерения пульсаций скорости.

В докладе представлены результаты исследований метода теплового зондирования, в котором в качестве чувствительного элемента использован нагретый спай термопары. Нагрев спая осуществлен прямым пропусканием переменного тока.

На рис.1 представлена схема ТИСа, позволяющая получить значительный тепловой поток в месте спая.

В схеме спай 1, образованный термоэлектродами 3 и 4, включен в зону нагрева 2. Зона нагрева выполнена из провода с большим электрическим сопротивлением (например, нихром). К зоне нагрева источник питания подключен через соединительные провода 5 и 7, выполненные из медных проводов (малое электрическое сопротивление) и узел разводки 6. Термоэлектроды, образующие спай через узел разводки и термоэлектродные (компенсационные) провода подключены к измерителю термоЭДС 8.

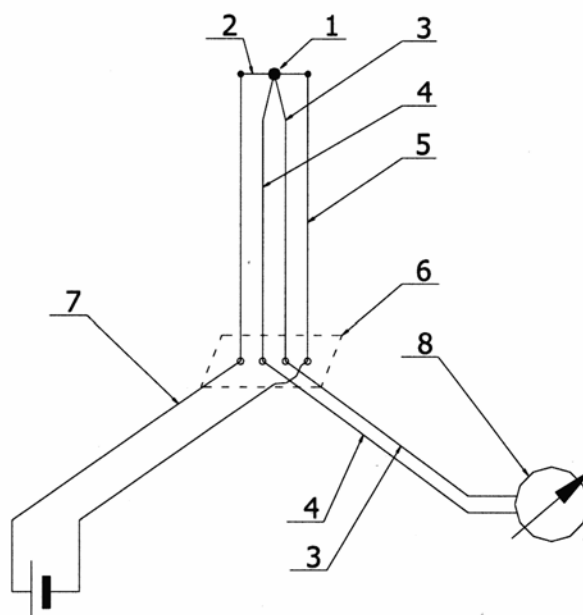


Рис. 1. принципиальная схема датчика ТИС.

Такое схемное решение позволило обеспечить основное условие, необходимое для работы ТИС. Электрическое сопротивление зоны нагрева намного больше электрического сопротивления подсоединительных проводов.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТИС

Определение скорости жидкости с помощью ТИС осуществляется на основе зависимости вида  $\Delta T_{ч.э} = f(W)$ . Теоретически получение данной зависимости довольно сложно. Поэтому вид зависимости был получен экспериментально.

Экспериментальная проверка работы ТИС и получение его характеристик выполнено на метрологическом стенде ФГУП «ЭНИЦ». Измерительная схема представлена на рис.2. Обработка полученных экспериментальных данных позволила получить функциональную зависимость для ТИС.

Опыты проводились следующим образом. Устанавливался расход воды через измерительный участок. Измерялся расход воды с помощью мерной емкости и секундомера. Измерялась температура воды  $T_f$  с помощью ТИС, отключенного от источника питания. Далее ТИС подключался к источнику питания и измерялась температура чувствительного элемента  $T_{ч.э}$ . Расход воды изменялся, и цикл измерений повторялся. Средняя по сечению скорость воды  $W$  определялась следующим образом:

$$W = Q / F_{тр} , \quad (1)$$

где  $F_{тр}$  - проходное сечение трубы,  $m^2$ ;  $Q$  - объемный расход,  $m^3/c$ .

На рис.3 показана зависимость перепада температур на чувствительном элементе от средней скорости воды в трубе  $\Delta T = f(W)$ . Зависимость получена при следующих параметрах: ток через чувствительный элемент 2,2 А, средняя плотность

теплого потока с поверхности зоны нагрева  $\sim 29 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$ . Для получения функциональной связи вида  $W = f(\Delta T, \nu, \rho)$  проведена обработка полученных данных, в качестве базовой использовалась зависимость:

$$Nu = A Re^{n_1} Pr^{n_2} , \quad (2)$$

Из выражения (2) получим:

$$W = \frac{(q/A)^{1/n_1} \cdot \nu_f}{d_{3,Н}^{(n_1-1)/n_1} \cdot \lambda_f \cdot Pr_f^{n_2/n_1} \cdot \Delta T^{1/n_1}} , \quad (3)$$

где  $q$  – плотность теплового потока с поверхности чувствительного элемента,  $\text{Вт/м}^2$ ;  $\Delta T = T_{ч.э} - T_f$  – разность между температурой чувствительного элемента и температурой теплоносителя,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $d_{3,Н}$  – диаметр зоны нагрева,  $\text{мм}$ ;  $F_{тр}$  – поверхность зоны нагрева,  $\text{мм}^2$ ;  $\lambda_f$  – теплопроводность теплоносителя (воды)  $\text{Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$ ;  $Pr_f$  – критерий Прандтля при температуре теплоносителя;  $A$ ,  $n_1$ ,  $n_2$  – безразмерные коэффициенты;  $Nu$  – критерий Нуссельта;  $Re$  – критерий Рейнольдса.

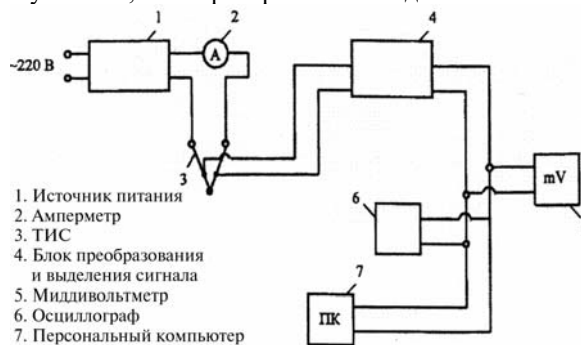


Рис. 2. Измерительная схема для экспериментальной проверки ТИС

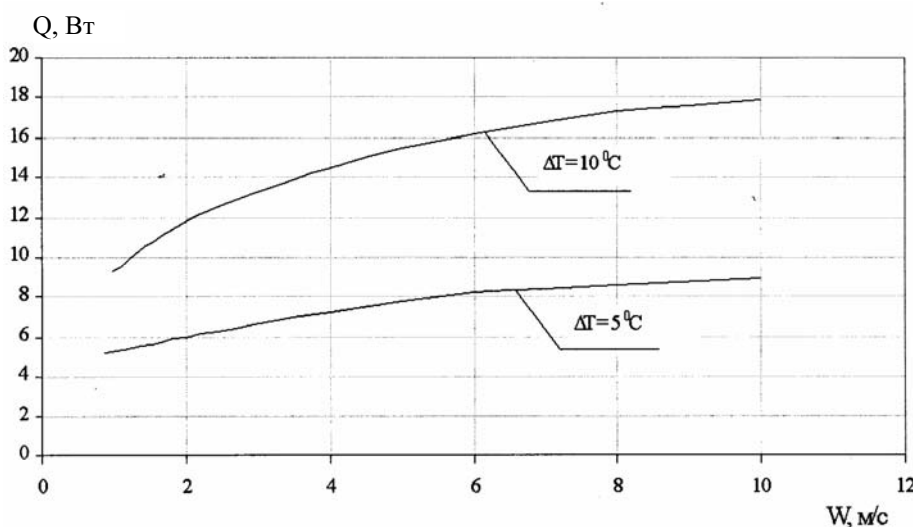


Рис. 3. Зависимость  $\Delta T = f(W)$ , вода,  $p = 0,1 \text{ МПа}$ ,  $T_f = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$

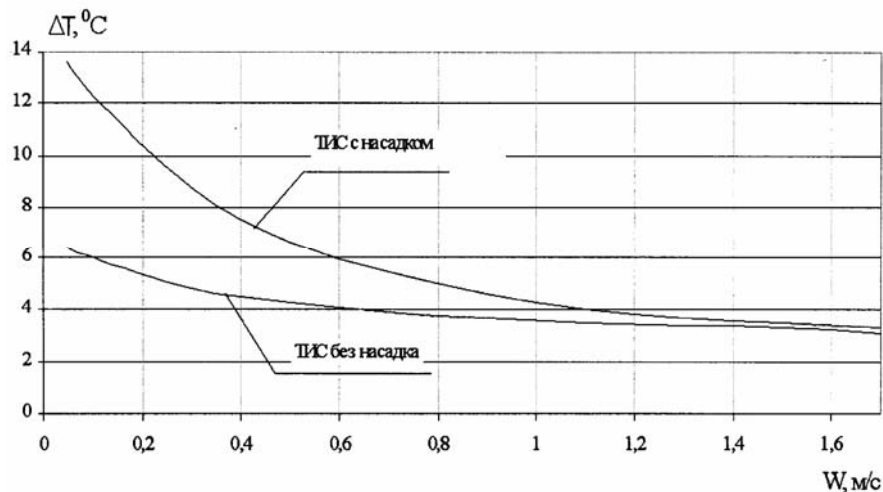


Рис. 4. Зависимость мощности зоны нагрева ТИС от скорости воды ( $P=0,1$  МПа,  $T_f=20$  °С)

На основе обработки опытных данных получим  $A = 1,41$ ,  $n_1 = 0,219$ ,  $n_2 = 0,38$ .

Для воды диапазон значений скоростей, определяемых с помощью ТИС, лежит в интервале  $0,2 \div 2$  м/с. Чувствительность ТИС в этом интервале скоростей  $1,4 \div 0,7$  м/с/°С.

Для пара и воды на линии насыщения при давлении  $p = 16,0$  МПа и  $0,1$  МПа чувствительность ТИС составляет соответственно  $\approx 1,6$  м/с/°С и  $25,0$  м/с/°С. С повышением скорости чувствительность ТИС снижается – для пара на линии насыщения  $P = 0,1$  МПа в диапазоне скоростей  $10-100$  м/с составляет  $\approx 4,0$  м/с/°С и в диапазоне скоростей  $100 \div 400$  м/с  $0,08 \div 1,1$  м/с/°С. Для воздуха при  $P = 0,1$  МПа и низких скоростях ( $1 \div 2$  м/с) чувствительность составляет  $\approx 30,0$  м/с/°С. В диапазоне  $W = 10 \div 100$  м/с чувствительность равна  $\approx 3,8$  м/с/°С, в диапазоне  $100 \div 400$  м/с –  $0,06 \div 0,08$  м/с/°С.

Увеличение чувствительности ТИС может быть достигнуто путем установки различных насадков. Благодаря насадку скорость обтекания чувствительного элемента ТИС уменьшается по сравнению со скоростью основного потока, в результате вид кривой  $\Delta T = f(W)$  изменяется, рис. 3.

Как и зависимость (3), градуировочная зависимость для ТИС с насадком устанавливает связь между  $\Delta T$  и средней скоростью воды в канале. При этом при градуировочных опытах измеряются  $\Delta T$  и средняя скорость воды в канале.

В рассмотренной выше схеме ТИС при измерении скорости поддерживалась фиксированная мощность (ток) в зоне нагрева. В этом случае имеет место зависимость  $\Delta T = f(W)_{q=\text{const}}$ . Для расширения диапазона измерения скорости воды возможно использование схемы ТИС, в которой поддерживается разность температур на чувствительном элементе, а тепловой поток (мощность) в зоне нагрева изменяется в соответствии с изменением скорости. На рис. 4 показана зависимость теплового потока (мощности) от скорости для ТИС, работающего по рассмотренной выше схеме. В качестве базового  $\Delta T$  приняты значения равные  $5$  и  $10$  °С. В этом случае диапазон работы ТИС с приемлемой чувствительностью расширяется до  $10$  м/с.

Были выполнены опыты по определению инерционности ТИС. В зависимости от геометрических размеров чувствительного элемента инерционность

ТИС составила  $0,1 - 0,3$  с. Малые значения инерционности позволяют рекомендовать ТИС не только для измерения скорости (расхода) в стационарных условиях, но и для определения скорости (расхода) в переходных и аварийных режимах работы установок.

## 2. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Представлены результаты исследований метода теплового зондирования с помощью прямого нагрева чувствительного элемента термопары (ТИС).
2. Экспериментально получена функциональная связь температурного напора на чувствительном элементе ТИС от скорости потока воды, физических свойств воды и плотности теплового потока в зоне нагрева. Анализ полученной зависимости показал, что для воды измерение возможно в диапазоне скоростей  $0,1 \div 2$  м/с с чувствительностью  $1 \div 1,5$  м/с/°С, для пара на линии насыщения при  $p=0,1$  МПа, для воздуха при  $p=0,1$  МПа возможный диапазон измеряемых скоростей, с чувствительностью не хуже  $1 \div 1,5$  м/с/°С составляет  $1 \div 100$  м/с.
3. Рассмотрены подходы, позволяющие расширить диапазон измерения скорости потока с помощью ТИС и снизить погрешность измерения скорости. В частности, показано, что использование насадков позволяет снизить погрешность определения скорости и повысить чувствительность метода. Использование схемы ТИС, в которой поддерживается разность температур на чувствительном элементе, а тепловой поток (мощность) в зоне нагрева изменяется в соответствии с изменением скорости ( $Q = f(W)_{\Delta T = \text{const}}$ ) позволяет расширить диапазон измеряемых скоростей для воды до  $10$  м/с.
4. Определена инерционность ТИС. В зависимости от геометрических размеров чувствительного элемента ТИС инерционность равна  $0,1 \div 0,3$  с.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кремлевский П.П.** Расходомеры и счетчики количества. М.: Машиностроение, 1989. 701 с.
2. **Леончик Б.И., Маякин В.П.** Измерение в дисперсных потоках. М.: Энергоатомиздат, 1981. 92 с.