

---

---

# ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

---

---

УДК 536.5

В. П. Ходунков

## МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НЕОДНОРОДНОГО ДИСПЕРСНОГО ПОТОКА

Рассматривается метод измерения локальных значений температуры потока, основанный на определении зависимости средней амплитуды пульсаций температуры на границе раздела поверхности с неоднородным потоком от средней разности температур. Представлено теоретическое обоснование, приведены экспериментальные результаты.

*Ключевые слова:* локальная температура, неоднородный поток, амплитуда, разность температур, зондирование.

Для большинства технологических процессов, основанных на использовании неоднородных дисперсных потоков (обжиг руд в кипящем слое, термообработка, сжигание низкосортных топлив в виброкипящем или фонтанирующем слое, сушка, утилизация отходов и др.) необходимо знать распределение локальных значений температуры в потоке. Сведения о температурных полях позволяют характеризовать протекающие реакции, а также эффективность работы технологического оборудования. Это особенно актуально для создаваемых энергетических установок с возобновляемыми источниками энергии, работающих при температуре 863—1073 К.

Существующие методы, приборы и устройства для измерения температуры не всегда обеспечивают требуемый результат, особенно на стадиях исследования, проектирования и последующей диагностики процесса. Особенно остро данный недостаток проявляется при использовании высокотемпературных крупномасштабных промышленных аппаратов, в которых традиционные зондовые методы измерения температуры (термопары, термометры сопротивления и др.) вследствие оттоков тепла по длине зонда дают скорее интегральные, чем локальные значения температуры потока. Существует также ограничение по глубине зондирования потока, обусловленное прочностными характеристиками термопреобразователей при значительных температурных и механических воздействиях потока. Возможности применения различных видов пирометров (яркостных, радиационных и др.) для измерения температурных полей также весьма ограничены вследствие сложности сканирования через непрозрачные стенки технологического аппарата. Поэтому разработка новых методов измерения локальных значений температуры для таких систем является актуальной задачей.

В настоящей работе представлен метод измерения локальных значений температуры в неоднородных дисперсных потоках.

Исходя из постановки задачи требуется решить две задачи:

— обеспечить локальность измерения температуры потока;

— расширить область применения метода для крупномасштабных потоков в широком диапазоне значений температуры.

Наиболее правильным представляется использовать в качестве базовых зондовые методы термометрии, с помощью которых вторая задача решается за счет применения охлаждаемых зондов, изготовленных из жаропрочных материалов. При этом существенно уменьшается влияние высокой температуры на прочностные характеристики зонда и обеспечивается возможность зондирования потоков большого (промышленного) масштаба.

Рассмотрим процесс нестационарного теплообмена твердого тела (зонда) с неоднородным потоком. Неоднородный поток можно представить в виде совокупности сменяющихся поочередно отдельных ограниченных в пространстве областей, характеризующихся средними по объему теплофизическими свойствами (теплопроводностью  $\lambda_i$ , удельной теплоемкостью  $c_i$ , плотностью  $\gamma_i$ , температурой  $T_{bi}$ , температуропроводностью  $a_i$  и др.,  $i$  — индекс области). Свойства потока являются интегральными по времени характеристиками данных областей, что справедливо и для температуры потока  $T_b$ .

Для описания механизма переноса теплоты от поверхности твердого тела к потоку воспользуемся граничными условиями третьего рода:

$$dQ_i = \alpha_i S (T_w - T_{bi}) d\tau_i = c_i \gamma_i V_i dT_{bi}, \quad (1)$$

где  $\alpha_i$  — коэффициент теплоотдачи  $i$ -й области с поверхностью, Вт/(м<sup>2</sup> К);  $S$  — площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>;  $dQ_i$  — количество теплоты, переданное от  $i$ -й области к поверхности (или наоборот), Вт;  $T_w$  — температура поверхности, К;  $d\tau_i$  — текущее время теплообмена  $i$ -й области с поверхностью, с;  $V_i$  — объем области, участвующей в теплообмене, м<sup>3</sup>;  $dT_{bi}$  — изменение температуры области за время  $d\tau_i$ , К. Преобразовав уравнение (1), получим

$$\frac{dT_{bi}}{T_w - T_{bi}} = A_i \alpha_i d\tau_i; \quad A_i = \frac{S}{c_i \gamma_i V_i}. \quad (2)$$

Проинтегрируем (2) по времени:

$$\int_0^{\tau_i} \frac{dT_{bi}}{T_w - T_{bi}} = \int_0^{\tau_i} A_i \alpha_i d\tau_i, \quad \ln \frac{T_w - T_{bi}(\tau_i)}{T_w - T_{bi0}} = -A_i \alpha_i \tau_i, \quad T_{bi|\tau_i=0} = T_{bi0}, \quad (3)$$

где  $T_{bi0}$  — начальная температура  $i$ -й области, К.

Из соотношений (3) получим зависимость изменения температуры от времени:

$$T_{bi}(\tau_i) = T_w - (T_w - T_{bi0}) \exp(-A_i \alpha_i \tau_i). \quad (4)$$

Изменение (амплитуда) температуры области за время теплообмена  $\tau_i$  составит:

$$\Delta T_{bi} = T_{bi}(\tau_i) - T_{bi0} = (T_w - T_{bi0}) \{ \exp(-A_i \alpha_i \tau_i) - 1 \}. \quad (5)$$

Поскольку нас интересует среднеинтегральная во времени локальная температура потока  $T_b$ , начальные значения температуры подходящих к поверхности областей  $T_{bi0}$  мало отличаются друг от друга, поэтому примем  $T_b = T_{bi0} = T_{b0} = \text{const}$  для времени наблюдения за процессом  $t \gg \tau_i$ . В таком случае среднее значение амплитуды изменения эффективной температуры областей ( $i=1, \dots, N$ ) за время наблюдения  $t$  можно оценить по формуле:

$$\overline{\Delta T_b} \approx \frac{T_w - T_{b0}}{t} \int_0^t \{ \exp(-A_i \alpha_i \tau_i) - 1 \} d\tau_i. \quad (6)$$

Из (6) следует, что среднее значение амплитуды  $\overline{\Delta T_b}$  прямо пропорционально осредненной разности температур теплообменной поверхности и потока:

$$\overline{\Delta T_b} = k(T_w - T_b), \quad k = \frac{1}{t} \int_0^t \{\exp(-A_i \alpha_i \tau_i) - 1\} d\tau_i. \quad (7)$$

Для отдельно взятой среды (потока) и типа теплообменной поверхности значение коэффициента  $k$  есть величина постоянная и не зависящая от разности  $(T_w - T_b)$ . Однако следует иметь в виду, что значения входящего в уравнение для  $k$  коэффициента теплоотдачи  $\alpha_i$  зависят от уровня температуры, поэтому сделанный выше вывод справедлив лишь в ограниченном диапазоне изменения температуры. Поскольку изменение температуры  $i$ -й области за время теплообмена с поверхностью составляет 1—10 К, указанной зависимостью можно пренебречь.

Из изложенного следует, что если на поверхности твердого тела, находящегося в состоянии теплообмена с исследуемым потоком, разместить малоинерционный преобразователь, он будет отслеживать изменения условий теплообмена (температуры потока), вызванные прохождением отдельных областей, а средняя во времени амплитуда изменения его собственной температуры  $\overline{\Delta T_w}$  будет прямо пропорциональна разности  $(T_w - T_b)$ . Зная значения  $\overline{\Delta T_{wj}}$  для каждой  $j$ -й разности температур  $(T_{wj} - T_b)$ , при условии

$$\overline{\Delta T_{wj}} = 0, \quad T_{wj} = T_b \quad (8)$$

и выполнив графическую экстраполяцию зависимости  $\overline{\Delta T_{wj}}(T_{wj})$ , можно точно определить значение локальной температуры потока  $T_b$ .

Отметим, что для определения искомой температуры  $T_b$  достаточно иметь несколько значений  $\overline{\Delta T_{wj}}$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ),  $T_{wj} \ll T_b$ , что особенно важно для высокотемпературных исследований.

Экспериментальная проверка метода выполнялась в лаборатории кафедры теплофизики СПбГУ ИТМО [1, 2]. В эксперименте определялась температура кипящего слоя, состоящего из частиц кварцевого песка. На рис. 1 представлены результаты лабораторных измерений — точки, прямая — аппроксимация.

Определенные в соответствии с предложенным методом значения температуры слоя ( $T_b = 298,5$  К) сравнивались с показаниями хромель-копелевой термопары, имеющей погрешность градуировки 3,5 %. Случайная и инструментальная погрешность при измерении данным методом в сумме составила 3,2 %. Расхождение в результатах — ~ 2 %.

Для высокотемпературных измерений была разработана конструкция водоохлаждаемого зонда (рис. 2), имеющего в своем составе малоинерционный термометр сопротивления (здесь 1 — корпус; 2 — платиновый термометр сопротивления; 3, 4 — элементы емкостного преобразователя структуры потока; 5 — трубчатые

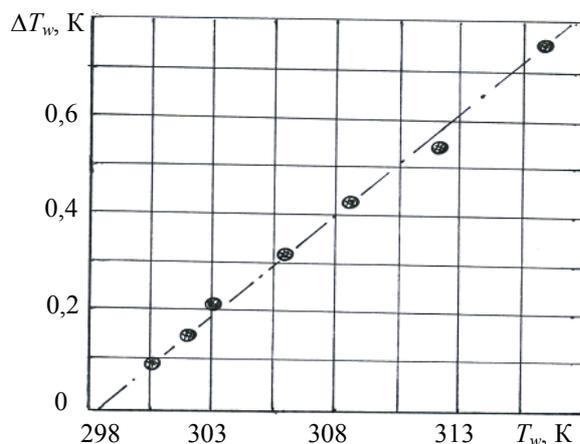


Рис. 1

элементы для подвода теплоносителя). Испытания проводились на обжиговой печи кипящего слоя с температурой 1053—1103 К. Зондирование слоя осуществлялось на глубину 2,5 м.

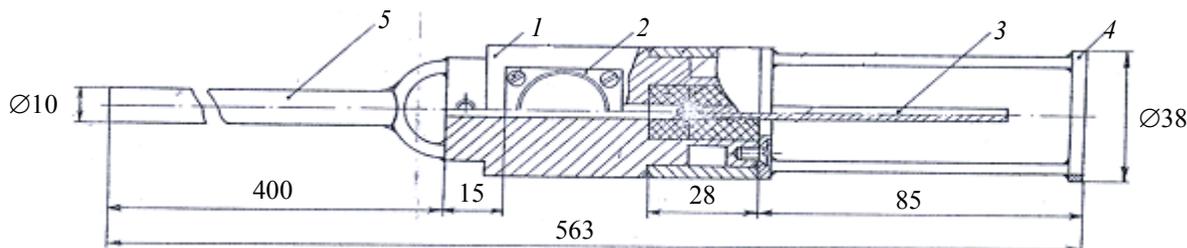


Рис. 2

Предложенный метод расширяет возможности исследования температурных полей в различных потоках. Главным условием применимости метода является наличие в потоке неоднородностей (областей), обуславливающих изменение интенсивности внешнего теплообмена. Такие неоднородности имеются практически в любых разновидностях потока: в кипящем слое — „пакеты частиц“ и „газовые пузыри“; в виброкипящем слое — области с различным эффективным давлением; в газожидкостном потоке — газовая фаза и жидкость; в газовом потоке — области с высоким и низким давлением и т.д. Кроме того, при слабой выраженности неоднородностей в потоке, изменяя положение зонда (например, поворачивая относительно горизонтальной оси), можно варьировать условия теплообмена.

Достоинство метода заключается в возможности точного измерения распределения температур по сечению потока, использования его для высокотемпературных исследований с одновременным повышением надежности и долговечности зондирующих устройств.

Автор работы надеется, что предложенный метод будет полезен для специалистов, занимающихся высокотемпературными измерениями, и послужит основанием для разработки новых измерительных приборов и устройств.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пилипенко Н. В. Нестационарная теплотметрия на основе параметрической идентификации дифференциально-разностных моделей теплопереноса в одномерных приемниках. Автореф. дис. ... докт. техн. наук. СПб: СПб ГУ ИТМО, 2009. 35 с.
2. Пилипенко Н. В., Ключев В. М., Ходунков В. П. Способы и устройства для определения основных параметров двухфазных дисперсных потоков // Мат. всесоюз. конф. „Методы и средства теплофизических измерений“. М.: МВТУ, 1987. С. 38—42.

#### Сведения об авторе

**Вячеслав Петрович Ходунков**

— аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра энергофизического мониторинга и компьютерной теплофизики;  
E-mail: walkerearth@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
энергофизического мониторинга  
и компьютерной теплофизики

Поступила в редакцию  
14.01.10 г.