

## ПРИМЕНЕНИЕ САМОКАЛИБРУЮЩИХСЯ ТЕРМОЭЛЕМЕНТОВ С РЕПЕРНЫМ МАТЕРИАЛОМ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ 500+650 °С В ПАРОГЕНЕРАТОРАХ

© Бернгард Ф., Богун Д., Августин С., Маммен Х., Донин А., 2003

Технический университет Ильменау, ФРГ

*Using integrated miniature fixed-point cells, a measuring uncertainty below 1 K can be reached under operating conditions in the superheated steam range of power plants by a periodic recalibration of the thermocouples, with operating times more of 20000 h. The fixed-point materials used for a temperature range of 500+650 °C are technically pure metals and binary alloys.*

**1. Введение.** Парогенераторы электростанций (ЭС) стандартно оснащают термоэлементами типа К или N. В связи с допустимыми отклонениями и увеличивающимся со временем дрейфом их передаточных характеристик приходится принимать возможную погрешность измерения температуры до 5 К.

Значительно уменьшая погрешности измерений, возможно снизить предписываемую минимальную разницу между температурой используемого перегретого пара и максимальным расчётным значением температуры для трубопроводов и арматуры паровой установки, тем самым повысив КПД ЭС и одновременно уменьшив выброс вредных веществ.

**2. Принцип.** Конструкция «самокалибрующегося термоэлемента» предполагает наличие калибратора, встроенного в термометр. Это миниатюрный контейнер с реперным материалом. В нем предусмотрена дополнительная полость для размещения рабочего конца термоэлемента. При изменениях температуры в области температуры плавления (застывания) реперного вещества из-за фазового перехода образуют характерные картины изменения термо-ЭДС, из которых могут быть получены калибровочные

значения для самого термоэлемента или для всей измерительной цепи при образцовой температуре.

Для промышленного использования этого принципа для автоматической посткалибровки по месту установки термоэлементов в рабочих условиях, например, на ЭС, необходимы такие предпосылки:

- долговременная стабильность миниатюрного контейнера с реперным веществом даже при температурах и температурных циклах значительно выше температуры фазового перехода;

- оптимальная, относительно измерения температуры, конструкция миниатюрного контейнера для реперного вещества, который может быть встроен в корпус (защитную гильзу) термометра стандартных размеров;

- наличие реперных веществ с хорошо воспроизводимыми температурами фазовых переходов вблизи рабочей температуры теплоносителя, для гарантии минимальной погрешности при калибровке в одной точке;

- автоматические алгоритмы поиска и обработки участков сигнала с фазовым переходом для получения достоверных калибровочных данных в реальных условиях эксплуатации.

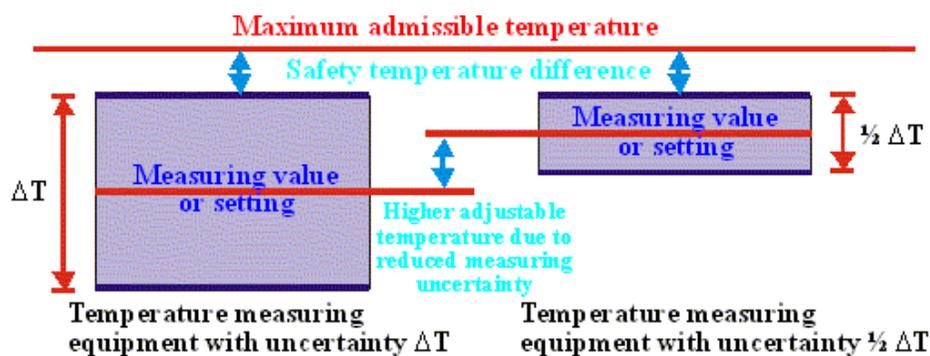


Рис. 1. Доверительный интервал измеряемых значений температуры и допустимая температура используемого перегретого пара

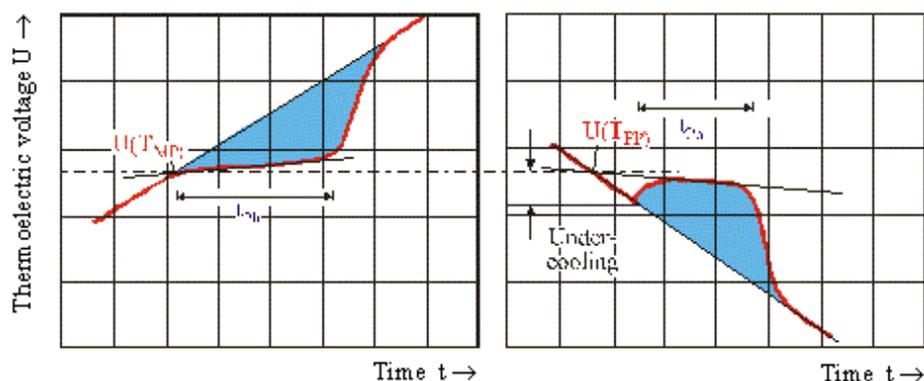


Рис. 2. Термо-ЭДС термоэлемента в калибраторе во время плавления или застывания реперного вещества

**3. Техническая реализация.** Выбирая вещество в качестве реперного материала, необходимо учитывать такие аспекты:

- температура фазового перехода при нормальном давлении должна быть на  $20 \div 50$  К выше рабочей температуры;
- доступность вещества необходимой чистоты ( $> 99.99\%$ );
- отношение энтальпии к количеству латентного тепла во время фазового перехода.

Таблица 1

#### Реперные материалы

Сплав	$T_{FP}$	Сплав	$T_{FP}$
$Cu_{23}Sb$	523,3 °C	$Al_{17}In$	638,4 °C
$Al_{67}Cu$	548,2 °C	$Cu_{30}Ge$	642,4 °C
$Ag_{71}Al$	567,6 °C	$Ag_{90}Ge$	652,4 °C
$Al_{87}Si$	578,7 °C	Al	660,3 °C
$Al_{75}Pd$	616,5 °C		

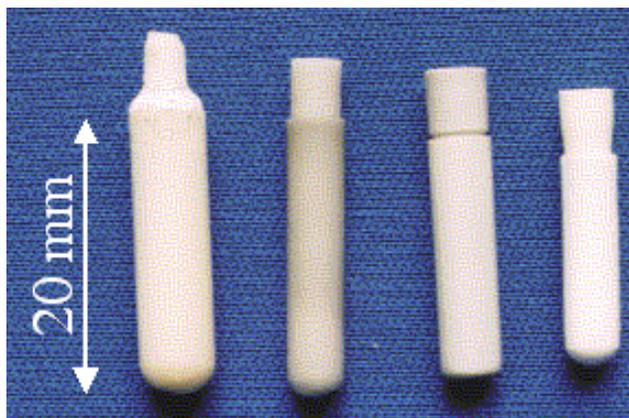


Рис. 3. Конструкции калибраторов

В результате совместной работы с крупными ЭС и в соответствии с их требованиями были сконструированы и опробованы на практике тестовые образцы термометров. При этом были успешно применены семь различных чистых металлов и бинарных сплавов с температурами фазовых переходов в области температур перегретого пара. Миниатюрный тигель калибратора, встраиваемого в термометр, должен сохранять содержащийся в нём реперный материал от проникновения чужеродных субстанций извне и других химических изменений. Материал тигля должен соответствовать таким требованиям:

- термическая стабильность в воздухе при рабочих температурах;
- долговременная химическая устойчивость к металлическим расплавам;
- доступность и технологичность при высокой чистоте материала;
- высокая теплопроводность и низкая теплоёмкость.

Такие керамики, как оксид и нитрид алюминия, нитриды кремния и бора являются подходящими материалами для тигля. Геометрия и материал тигля имеют решающее значение для формы и достоверности регистрируемых плато, т.е. в конечном итоге – для достижимой точности калибровки.

Была разработана новая форма миниатюрного керамического тигля, а также сопутствующие технологии его наполнения и закрытия. Они выделяются значительно улучшенной герметизацией, т.е. лучшей защитой реперного вещества от загрязнения с течением времени.

С помощью детального моделирования методом конечных элементов в новой конструкции возможно

увеличить объём реперного вещества на 50 %. Таким образом, длительность пригодных для калибровки участков фазовых переходов заметно возросла.

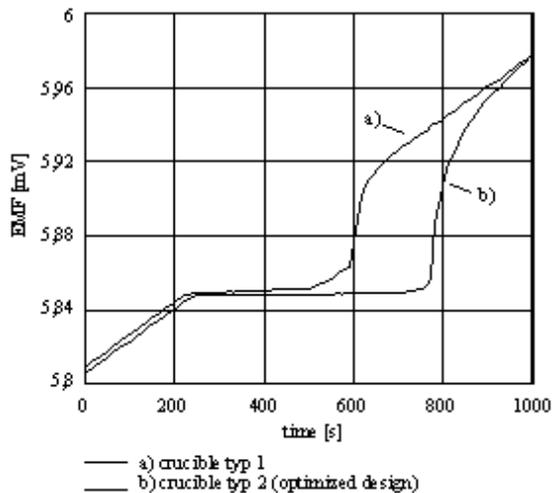


Рис. 4. Плато при плавлении реперного вещества в двух конструкциях миниатюрного тигля с наполнением алюминием

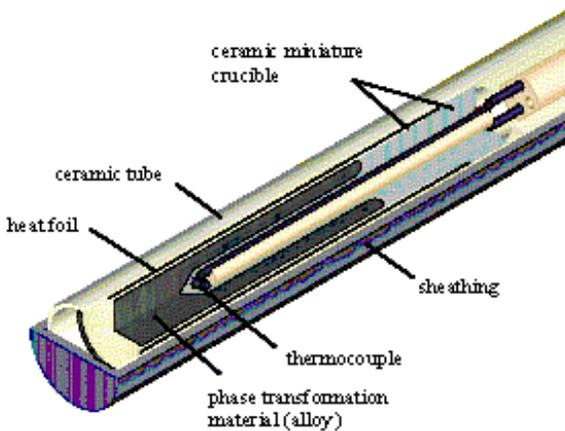


Рис. 5. Конструкция термометра со встроенным контейнером с реперным материалом и интегрированным нагревательным элементом

Дополнительно встроенный в термометр управляемый нагревательный элемент позволяет осуществлять калибровку измерительной цепи по внешним запросам даже при постоянной температуре пара.

При практической апробации достигнута погрешность определения реперной температуры менее 0,2 К и общая погрешность измерения температуры менее 1 К.

**4. Результаты.** По результатам тестирования в течение более 15000 часов наработки на различных ЭС при различных рабочих условиях были подтверждены:

- надёжность и долговременная стабильность разработанных миниатюрных калибраторов;
- воспроизводимость температуры фазового перехода;
- достаточная термическая и механическая прочность оснащённых ими оболочных термометров.

Ниже показаны циклы калибровки термометра со встроенным алюминиевым калибратором на ЭС при температуре пара 630 °С.

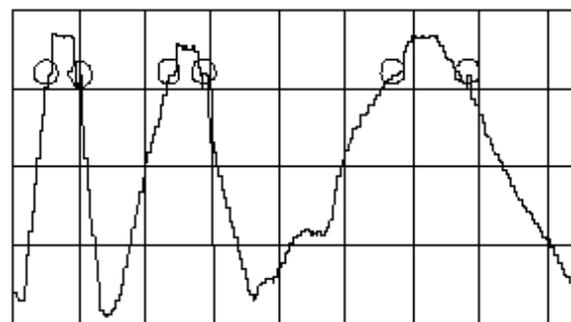


Рис. 6. Типовые циклы калибровки

Термометр со встроенным алюминиевым калибратором, после наработки более 1 года на ЭС при температуре пара 630 °С, был проверен в калибровочной лаборатории. Результаты представлены на рис. 7 и 8. Измеренные плато всё ещё хорошо пригодны к вычислению калибровочного значения. Установленная реперная температура изменилась менее чем на 100 мК. Основная разница между кривыми обусловлена дрейфом термоэлемента, который может быть скорректирован.

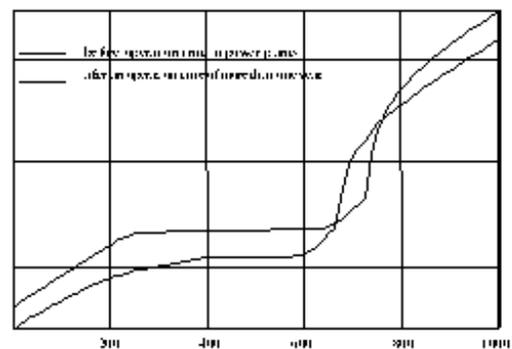


Рис. 7. Плато плавления до и после долговременного теста в условиях ЭС

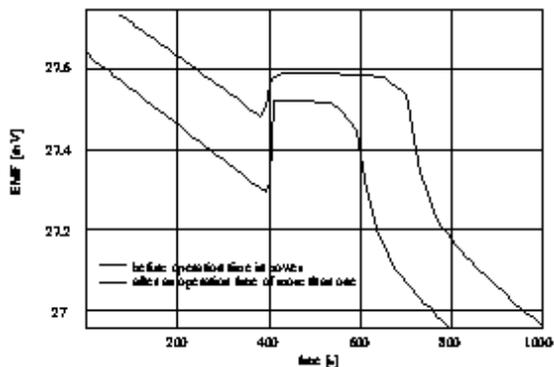


Рис. 8. Плато застывания до и после долговременного теста в условиях ЭС

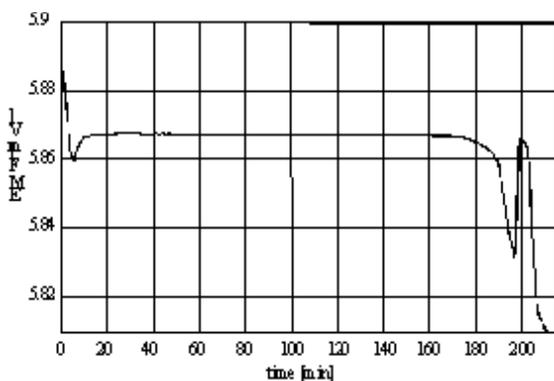


Рис. 9. Плато застывания образцового алюминиевого калибратора ( $T_{FP} = 660.323 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и алюминиевого миниатюрного калибратора

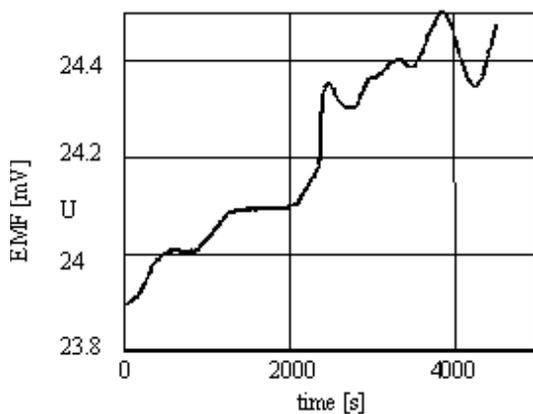


Рис. 10. Цикл калибровки (температура пара около  $565 \text{ }^\circ\text{C}$ )

Можно предположить, что температура застывания материала (алюминий) в миниатюрном калибраторе изменяется очень незначительно в течение долговременных измерений в промышленных условиях. Сравнительные испытания термометра со

встроенным калибратором, выполненные в стандартном образцовом алюминиевом калибраторе, показали на основе профилей термо-ЭДС разницу около  $-70 \text{ мК}$  между коротким плато миниатюрного калибратора (рис. 9, правая часть кривой) и длинным образцовым плато температуры застывания (левая часть кривой).

Также были выполнены долгосрочные испытания на нескольких ЭС с использованием сплавов в качестве реперного материала.

Таблица 2

#### Температуры пара и реперные материалы, использованные в долгосрочных испытаниях

Средняя температура пара	Реперный материал	Температура фазового перехода
$535 \text{ }^\circ\text{C}$	Al67/Cu	$548,2 \text{ }^\circ\text{C}$
$565 \text{ }^\circ\text{C}$	Al87/Si	$578,7 \text{ }^\circ\text{C}$
$630 \text{ }^\circ\text{C}$	Al	$660,3 \text{ }^\circ\text{C}$

Посредством миниатюрных нагревателей, встроенных в термометры, было возможно практически линейно изменять внешнюю температуру миниатюрного калибратора на  $30 \text{ К}$ . Скорость изменения: от  $0.1 \text{ К/мин}$  до  $1 \text{ К/мин}$ . Регистрируемые плато фазовых переходов показали хорошую воспроизводимость как формы, так и вычисляемых по ним калибровочных значений. Не было отмечено существенной зависимости калибровочного значения от скорости плавления или застывания (рис. 7 и 8).

В течение долговременных испытаний, длившихся более года при температурах пара  $535 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $565 \text{ }^\circ\text{C}$ , не было отмечено существенных изменений плато фазовых переходов, регистрируемых при температуре  $548.2 \text{ }^\circ\text{C}$  для Al67/Cu и  $577.2 \text{ }^\circ\text{C}$  для Al87/Si (табл. 2). Применённые миниатюрные калибраторы, нагревательная система и конструкция термометра показали высокую долговременную термическую и механическую стабильность.

**5. Автоматическое распознавание и обработка сигнала.** Цель автоматического обнаружения: даже для изменяющейся термо-ЭДС со значительными помехами обнаружить профили сигнала, типичные для фазовых переходов в реперном материале. Задание типовых образцов профилей сигнала до, во время и после фазового перехода является основой автоматического алгоритма для определения положения калибровочных участков в сигнале (во времени).

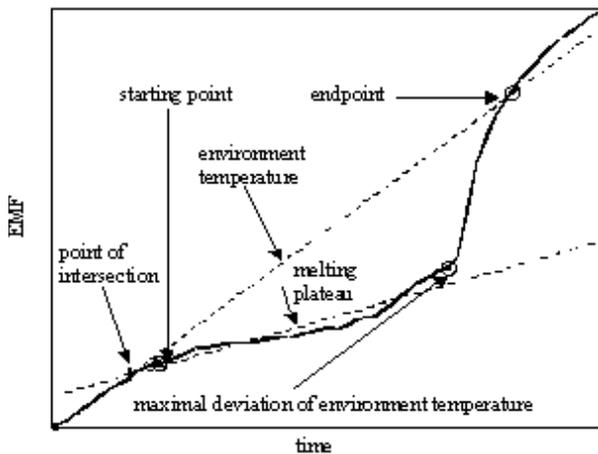


Рис. 11. Схематическое представление участков фазового перехода

Для вычисления калибровочного значения два участка профиля термо-ЭДС приближают отрезками прямых:

- изменение сигнала до начала фазового перехода (внешняя температура);
- участок “плато”, возникающий во время плавления (застывания).

Окончание участка плато определяется поиском точки на кривой фазового перехода, с максимальной разницей к прямой “внешней” температуры.

При аппроксимации методом наименьших квадратов для обоих отрезков определяют оценки коэф-

фициентов прямых и их дисперсий. Так могут быть вычислены координаты точки пересечения обеих прямых, а также оценён доверительный интервал вычисленного значения термо-ЭДС  $U(T_{FP})$  в точке пересечения.

Значения наклонов прямых, а также соотношение наклонов, могут быть использованы для отбрасывания непригодных для калибровки или неправильно распознанных как фазовый переход участков сигнала. Перед принятием найденной точки пересечения в качестве калибровочного значения должна проверяться его “правдоподобность”. Проверяется гипотеза о нахождении вычисленного в точке пересечения значения термо-ЭДС в полосе допуска, задаваемой на основе нескольких предыдущих калибровочных значений.

Выше показаны значения температуры, определенные из калибровочных значений термо-ЭДС с использованием стандартной характеристики преобразования термоэлемента. В сравнении с изменением температуры текущие калибровочные значения дрейфуют совместно с изменением реальной характеристики преобразования термоэлемента и смещения АЦП, используемого в измерениях.

В течение 80-дневных испытаний, при отсутствии промежуточных дополнительных калибровок термометра, был отмечен дрейф около 0.2 К. Эквивалентный разброс соседних калибровочных значений составил менее 50 мК.

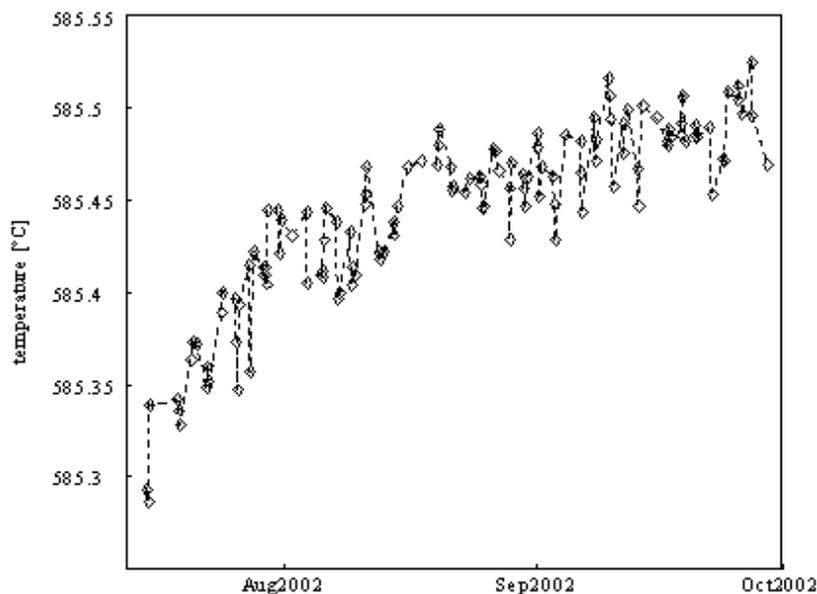


Рис. 12. Температуры, соответствующие калибровочным значениям, полученные на ЭС с использованием термометра со встроенным AISi калибратором (без коррекции характеристики преобразования)

**6. Висновок.** Результатом стали прототипи термометрів со встроєним контейнером с реперним матеріалом. На практиці доведена їх довговременна термічна і механічна стабільність в робочих умовах на ЕС. Термометри дозволяють зменшити погрешність вимірювання температури перегретого пара к менше чем 1 К. Это является значительной предпосылкой для уменьшения предписываемой минимальной разницы между температурой пара и граничными значениями для установки, что позволит повысить КПД ЕС.

Новая измерительная система передана для промышленного применения.

1. Boguhn D., Augustin S., Bernhard F., Mammen H. Phase transformations of technically pure metals and two-component alloys in miniature fixed-point crucibles. *High Temperature - High pressure*, 33 (2001). – № 4. – S. 419–426. 2. Boguhn D., Augustin

S., Bernhard F., Mammen H., Tischler M. Application Of Binary Alloys In Miniature Fixed-point Cells As Secondary Fixed Points In The Temperature Range From 500 °C To 660 °C. *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry, 8th Symposium, Chicago 2002*. 3. Augustin S., Bernhard F., Boguhn D., Donin A., Mammen H. Industrial applicable miniature fixed-point thermocouples. *TEMPMEKO 2001 - 8th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science, Berlin, 2001.* – Vol.1. – S. 3–8. 4. Bernhard F., Boguhn D., Augustin S., Mammen H., Donin A. Application of Self-calibrating Thermocouples with Miniature Fixed-point Cells in a Temperature Range from 500 °C to 650 °C in Steam Generators. *XVII IMEKO World Congress, June 2003, Dubrovnik*. 5. Donin A., Boguhn D., Bernhard F. Kalibrierwertermittlung bei Phasenumwandlungsvorgängen in Miniatur-Fixpunkt-Zellen. *Temperatur 2003, Berlin*. 6. Саченко А.А., Мильченко В.Ю., Кочан В.В. Измерение температуры датчиками со встроенными калибраторами. *Библиотека по автоматике.* – М., 1986.

УДК 532.536

## ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ГАЗОВИХ СЕРЕДОВИЩ

© Фединець В., 2003

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра автоматизації теплових та хімічних процесів,  
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

*Досліджують динамічні характеристики термоперетворювачів залежно від умов їх теплообміну з газовим середовищем.*

*Исследуют динамические характеристики термопреобразователей в зависимости от условий их теплообмена с газовой средой.*

*Dynamic characteristics of converters of temperature are investigated depending on conditions of their heat exchange with the gas environment.*

**Постановка задачі.** Внаслідок певного значення теплоємності чутливого елемента (ЧЕ) термоперетворювача (ТП) його температура завжди буде меншою від температури газового середовища (ГС), якщо вона змінилася. При вимірюванні змінної в часі температури ГС ТП також не встигає стежити за зміною температури, оскільки для цього потрібен деякий час. Спотворення показів ТП через нестационарності як в самому ТП, так і між ТП та довкіллям зумовлені тепловою інерцією. Внаслідок теплової інерції виникає додаткова різниця між температурами ЧЕ і ГС, яка визначає динамічну похибку вимірювання температури ГС.

Визначити динамічну похибку можна, оцінивши умови теплообміну ТП з ГС і стінками, що його оточують, а також теплоємності ЧЕ. На теплообмін ТП одночасно можуть впливати багато чинників. Деякі з них можуть бути корисними і тоді ТП буде отримувати тепло від ГС. Під час дії шкідливих впливів ТП може одержувати або віддавати тепло, взаємодіючи з довкіллям або іншими джерелами тепла. Тому розв'язання рівняння теплового балансу ТП при сумісній дії на нього всіх впливів значно ускладнюється.

**Публікації.** Аналітичні залежності для визначення динамічних похибок вимірювання температури газо-