

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«ГОМЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ П.О. СУХОГО»**

---

УДК 681.5.017+681.586

**Ковалев Алексей Викторович**

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ  
ГАЗОАНАЛИТИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ  
И УПРАВЛЕНИЯ ПУТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ  
ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА  
ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ**

05.13.05 - Элементы и устройства вычислительной техники  
и систем управления

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

Гомель 2006

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Обеспечение безопасности технологических процессов всегда являлось и является актуальной задачей. Для этой цели используются газоаналитические системы контроля и управления (ГСКУ) технологическими процессами: рудничной атмосферы, атмосферы рабочей зоны взрывоопасных производств, сжигания топлива в теплоэнергетических установках и т. д. Основными элементами ГСКУ являются первичный преобразователь (ПП) и измерительный преобразователь (ИП), работа которых может быть основана на различных принципах действия и, в первую очередь, их метрологические характеристики влияют на качество управления технологическими процессами. Зачастую ИП и ПП ГСКУ объединены в один функциональный блок, называемый газоанализатором либо сигнализатором.

Многие газоанализаторы указанных систем работают с ПП на основе термохимических датчиков (ТХД), которые благодаря своей простоте, надежности, высокой селективности по отношению к горючим газам играют большую роль в создании инструментальных средств автоматического контроля взрывобезопасности атмосферы на предприятиях горной, нефтехимической, газовой, нефтеперерабатывающей и других отраслях промышленности.

Существующий уровень технологии производства ТХД вполне удовлетворяет газоаналитические системы обеспечения взрывобезопасности. Однако существуют области применения ТХД, где от них требуется высокая точность и чувствительность в значительном диапазоне изменения температуры измеряемой среды (ИС). Например, в энергетическом секторе актуальной является задача контроля эффективности сжигания топлива в теплоэнергетических установках, где степень эффективности оценивается по результатам анализа отходящих дымовых газов. Применение высокоточных элементов ГСКУ (ПП, ИП), помимо экономии топлива (порядка 3...5 %), позволит значительно уменьшить количество вредных выбросов в атмосферу. Однако при существующем уровне идентичности параметров элементов ТХД, использование их в известных схемах ИП не позволяет достичь требуемых метрологических характеристик. Как правило, в этих областях применения газоаналитических средств чаще всего используется электрохимический метод детектирования горючих газов. Он характеризуется высокой разрешающей способностью порядка 10 ррт и малой дополнительной погрешностью измерения. Достичь схожих метрологических характеристик возможно, используя и термохимический метод детектирования при термостатировании ИС с заданной точностью. Однако это приводит к увеличению потребляемой мощности и уменьшению ресурса работы датчика.

Недостаточная теоретическая и практическая проработка вопросов влияния характеристик элементов ТХД, в том числе и учет влияния разброса их теплофизических и электрических параметров на полезный сигнал ИП, усложняет возможность оптимального проектирования и сдерживает использование широких возможностей термохимического метода детектирования горючих газов для решения многих газоаналитических задач прикладного характера. Это, в первую очередь, задач, связанных с интегральным, селективным и другими видами анализа в виду того, что основным препятствием получения высокой точности преобразования является влияние изменения температуры ИС на результат измерения.

В связи с отмеченным, поиск путей повышения эффективности газоаналитических систем управления и контроля, а именно — увеличение точности ПП и ИП, является актуальным.

**Связь работы с крупными научными программами, темами.** Работа выполнялась по приоритетным направлениям научно-технической деятельности Республики Беларусь «Приборостроение» и «Автоматизированные системы управления и информационные технологии» в соответствии с темами научно-исследовательских работ на кафедре «Промышленная электроника» Учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого» в рамках: ГНТП «Приборы и средства измерения» № 03/310-15 п. 3.11, № гос. регистрации 2000367 (1998-2002); ГНТП «Электроника» - № гос. регистрации 20011988 (2001-2005); х/д № 412 «Разработка измерителя концентрации монооксида углерода для теплоэнергетических установок».

**Цель и задачи исследования.** Цель работы - разработка способов повышения точности элементов ГСКУ, в частности, ПП и ИП, за счет регулирования температурного режима термохимических датчиков.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

- разработать математическую модель термохимических датчиков, учитывающую их технологические несовершенства, и на основе которой провести сравнительный анализ известных ИП для ГСКУ;
- определить пути совершенствования известных и найти новые технические решения измерительных преобразователей для термохимических датчиков (ИПТХД) для ГСКУ с повышенной точностью;
- разработать методику и алгоритм определения параметров элементов ТХД, необходимых для технически обоснованного построения ИП в расширенном температурном диапазоне ИС;
- определить пути повышения чувствительности и точности ПП и ИП газоаналитических систем контроля и управления теплоэнергетическими установками;

- провести экспериментальные исследования свойств ТХД и разработанных с их использованием высокоточных ИП в расширенном температурном диапазоне ИС;
- разработать, исследовать и освоить в серийном производстве измеритель объемной концентрации монооксида углерода в отходящих дымовых газах теплоэнергетических установок.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования являются ГСКУ. Предметом исследования являются первичные и измерительные преобразователи на основе ТХД.

**Гипотеза.** Предполагается, что за счет регулирования температурного режима элементов термохимических датчиков с неидентичными электрическими и теплофизическими параметрами возможно повысить точность измерительных преобразователей газоаналитических систем контроля и управления.

**Методология и методы проведенного исследования.** При аналитическом и численном моделировании элементов ГСКУ (ТХД и ИПТХД) использовались традиционные методы алгебры, математического анализа с применением ПЭВМ и аппарат анализа электронных цепей.

Достоверность полученных результатов подтверждена экспериментальными исследованиями ТХД, ИПТХД и протоколом испытаний измерительной схемы опытного образца ИПТХД повышенной чувствительности и температурной стабильности.

**Научная новизна и значимость полученных результатов** заключается в следующем:

- разработана математическая модель ТХД, учитывающая неидентичность параметров ИЭ и КЭ, и впервые проанализировано влияние технологических несовершенств ТХД на результат преобразования известных ИПТХД;
- разработаны методика и алгоритм определения параметров и математическая модель элементов ТХД, необходимые для технически обоснованного построения измерительных преобразователей в расширенном температурном диапазоне;
- определены пути совершенствования ПП и ИП для ГСКУ в узком и расширенном температурном диапазонах измеряемых воздушных сред за счет регулирования температурных режимов ТХД, что позволило уменьшить температурные погрешности и повысить чувствительность термохимического принципа детектирования горючих газов до уровня электрохимических средств обнаружения;
- предложены ИП и способы формирования полезной информации с использованием ТХД, обладающие малыми температурными погрешностями и основанные на измерении температуры внутри реакционной камеры ТХД, для систем оптимизации процессов сжигания топлива в теплоэнергетических установках.

**Практическая и экономическая значимость полученных результатов.** *Практическая значимость* работы заключается в следующем:

- разработаны новые методика и алгоритм определения основных характеристик и параметров элементов ТХД, позволяющие осуществлять инженерный расчет ИПТХД;
- определены пути снижения влияния технологических несовершенств элементов ТХД на полезный сигнал ИП в традиционных областях применения термохимического метода детектирования горючих газов;
- найдены технические решения для пяти ИПТХД с уменьшенной дополнительной погрешностью для использования их в составе ГСКУ при расширенном температурном диапазоне ИС для измерения значительных концентраций горючих компонентов;
- предложены технические решения, позволяющие повысить эффективность систем контроля и управления процессами сжигания топлива за счет применения высокоточных ИПТХД;
- основные результаты теоретических и экспериментальных исследований, полученные в работе, внедрены в серийно освоенном измерителе объемной концентрации монооксида углерода в отходящих дымовых газах для теплоэнергетических установок ИКСОД-1 на РУП «Гомельский завод измерительных приборов» (ЗИП), преимущество которого подтверждено протоколом первичных испытаний автоматических газоанализаторов АГТ-СО и ИКСОД-1 в реальных условиях эксплуатации на котле ТП-87 ст. № 7 Минской ТЭЦ-3.

*Экономическая значимость.* Предложенные схемные реализации, алгоритм определений основных параметров датчика позволяют построить эффективные высокоточные газоаналитические системы контроля и управления для технологических сред. Их применение позволит существенно сократить потребление энергоресурсов на 3...5 % и продлить срок службы теплоэнергетических установок на 20...30 % за счет оптимизации процессов сжигания топлива.

**Основные положения диссертации, выносимые на защиту.** Автором защищаются:

1. Аналитическая математическая модель ТХД, учитывающая их технологические несовершенства.
2. Методика и алгоритм определения основных параметров ТХД, необходимые при инженерном расчете ИПТХД газоаналитических систем контроля и управления.
3. Технические решения ИПТХД с уменьшенным влиянием технологических несовершенств элементов ТХД на выходной сигнал, за счет регулирования температурных режимов датчиков, в традиционных областях применения термохимического метода детектирования горючих газов.
4. Способы повышения чувствительности ИПТХД в широком диапазоне температур ИС для газоаналитических систем контроля и управления теплоэнергетическими установками..

**Личный вклад соискателя.** Приведенные в настоящей работе результаты получены лично автором или при его непосредственном участии. Анализ результатов проведен под руководством научного руководителя.

**Апробация результатов диссертации.** Основные результаты работы докладывались, обсуждались и получили положительные отзывы:

- на международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиноведения» (г. Гомель, 1998, 2000, 2004);
- на международной научно-технической конференции «Метрологическое обеспечение качества-2002» (г. Минск, 2002);
- на международной научно-технической конференции «Дни науки» (г. Белгород, 2005);
- на международной межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и магистрантов (г. Гомель, 2006).

**Опубликованность результатов.** Результаты выполненных исследований опубликованы в одной статье журнала «Доклады НАН Беларуси», в двух статьях журнала «Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого», в двух статьях сборника научных трудов «Поиск и освоение нефтяных ресурсов Республики Беларусь», в трех статьях материалов международных конференций, в двух тезисах докладов. Получено два патента Республики Беларусь: № 676 (по заявке и20020008 от 11.01.02) и № 896 (по заявке и20020311 от 31.10.02) на полезную модель. Всего объем опубликованных материалов составляет 56 страниц.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Полный объем диссертации составляет 148 страниц, в том числе 54 рисунка на 43 страницах, 3 таблицы на 3 страницах, восемь приложений на 28 страницах, список используемых источников включает 126 наименований на 9 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** кратко рассмотрено современное состояние проблемы использования термохимического принципа детектирования горючих газов в составе газоаналитических систем контроля и управления (ГСКУ), а также приведен ряд примеров, подчеркивающих необходимость проведения научно-исследовательских работ в данной области.

**В общей характеристике работы** обоснована актуальность выбранной темы, изложены методология и методы проведенных исследований, указаны научная, практическая и экономическая значимости полученных и ожидаемых результатов, сформулированы цель и задачи исследования.

**В первой главе** рассмотрены основные компоненты газоаналитических систем контроля и управления: первичный преобразователь (ПП), измерительный преобразователь (ИП), исполнительное устройство (ИУ), блок контроля и управления (БКУ). Дана краткая характеристика объектов управления. Произведен обзор принципов действия ПП, наиболее широко используемые при построении ГСКУ. Рассмотрены области их применения, достоинства и недостатки. Указаны практические трудности использования термохимического принципа действия ПП при построении высокоточных ГСКУ.

Рассмотрены конструкции современных ТХД и принцип их работы. Проанализированы особенности условий теплообмена элементов ТХД и их температурные режимы. Перечислены технические характеристики ТХД, предоставляемые их производителями, и параметры, необходимые для инженерного расчета ИП. Многие характеристики для измерительного (ИЭ) и компенсационного (КЭ) элементов неидентичны в силу специфики их производства (степень черноты, габаритные размеры, начальные сопротивления и т. п.). Рассмотрены причины возникновения отмеченных несовершенств.

На основе аналитического обзора предложена классификация ИПТХД по способу регулирования температурного режима элементов датчика. Рассмотрены принципы построения измерительных преобразователей ГСКУ на основе ТХД и приведены их краткие технические характеристики, свойства, области применения.

Сделан вывод о том, что одной из основных причин возникновения значительных температурных погрешностей ИП является разброс теплофизических, геометрических и электрических параметров ИЭ и КЭ. Это же обстоятельство является сдерживающим фактором повышения чувствительности термохимического метода обнаружения горючих газов. С учетом вышесказанного были сформулированы цели и задачи проводимых исследований.

**Во второй главе** изложены вопросы теории элементов термохимического датчика и причины, приводящие к технологическим несовершенствам ТХД.

В аналитической форме, на основе баланса мощностей элементов ТХД

$$I^2 R_0 (1 + \beta t_3) + Q = \alpha F (t - t_0), \quad (1)$$

была предложена математическая модель ТХД, учитывающая неидентичность ИЭ и КЭ, представленная в виде:

$$\begin{cases} I^2 B_0 (1 + \delta_R - \delta_S) = t_{И} - t_0 - t_X, \\ I^2 B_0 = t_K - t_0, \end{cases} \quad (2)$$

где  $I$  – ток, протекающий по элементам ТХД;  $R_0, \beta, t_Э$  – соответственно начальное сопротивление, ТКС, температура термоэлемента;  $Q$  – мощность, выделяемая в результате беспламенного каталитического окисления горючих компонентов на поверхности ИЭ;  $\alpha, F, t$  – соответственно эффективный коэффициент теплообмена, площади, температура поверхности термоэлемента ТХД;  $t_0$  – температура ИС;  $t_{И} (t_K)$  – температура рабочей поверхности ИЭ (КЭ);  $B_0$  – терморезистивный коэффициент элемента ТХД, учитывающий его теплофизические и электрические особенности;  $\delta_R, \delta_S$  – разброс начальных электрических сопротивлений, теплофизических параметров ИЭ и КЭ;  $t_X$  – приращение температуры поверхности ИЭ, пропорциональное концентрации горючих компонентов в ИС.

На основании использования уравнений (1) и (2), получены выражения для определения значения электрических сопротивлений ИЭ ( $R_{И}$ ) и КЭ ( $R_K$ ) в следующем виде:

$$\begin{cases} R_{И} = R_0 (1 + \delta_R) (1 + \beta t_{И}) = R_0 (1 + \delta_R) (1 + \beta (I^2 B_0 (1 + \delta_R - \delta_S) + t_0 + t_X)), \\ R_K = R_0 (1 + \beta t_K) = R_0 (1 + \beta (I^2 B_0 + t_0)). \end{cases} \quad (3)$$

На основании (2) и (3) получены выражения выходных сигналов, представленные в таблице, для известных ИПТХД с различными способами регулирования температурного режима ТХД. Там же отмечены достоинства и недостатки каждого из способов формирования полезного сигнала ИПТХД.

Проведенный анализ влияния технологических несовершенств ТХД на выходной сигнал ИП показал, что актуален поиск способов построения ИПТХД с линейной и термостабильной характеристиками преобразования.



Результаты анализа выходных сигналов ИПТХД с учетом технологических несовершенств датчика

Тип ИП	Выходной сигнал	Достоинства	Недостатки
Мост, питаемый напряжением	$\frac{E}{4} \left[ \frac{\beta(1 + \delta_R)Y_X + \delta_R + \beta(2\delta_R - \delta_S)Y_K}{\beta(1 + \delta_R)Y_X + \beta(\delta_S - \delta_R)Y_0 + \frac{\delta_R}{2} + \beta(1 + \delta_R - \frac{\delta_S}{2})Y_K} \right]$	Простота технической реализации	Нелинейность и термозависимость характеристики преобразования (влияние $\delta_R, \delta_S$ )
Мост, питаемый током	$\frac{IR_0}{2} \left[ \beta(1 + \delta_R)Y_X + \delta_R + \delta_R\beta Y_0 + \beta I^2 B_0 (2\delta_R - \delta_S) \right]$	Простота технической реализации	Термозависимость характеристики преобразования (влияние $\delta_R$ )
ИПТХД со стабилизирующей температуры КЭ	$R_0 \frac{\sqrt{t_K - t_0}}{2} \sqrt{B_0} \left[ \beta(\delta_R - \delta_S)Y_K + \beta(\delta_R - \delta_S)Y_0 - \beta t_X \right]$	Рабочая точка стабильна в области диффузионного окисления	Термозависимость характеристики преобразования (влияние $\delta_R, \delta_S$ )
ИПТХД со стабилизирующей температуры ИЭ	$R_0 \frac{\sqrt{t_H - t_0 - t_X}}{2} \sqrt{B_0} \left[ \frac{2\beta t_X + \beta(1 - 2\delta_R + 2\delta_S)Y_0}{(1 + \delta_R - \delta_S)} \right]$	Рабочая точка стабильна в области диффузионного окисления	Термозависимость характеристики преобразования (влияние $\delta_R, \delta_S$ )
ИПТХД со стабилизирующей температуры ИЭ и КЭ	$\frac{R_0}{\sqrt{B_0}} \left[ \frac{\sqrt{t_H - t_0 - t_X}}{\sqrt{B_0} (1 + \delta_R - \delta_S)} (1 + \delta_R) \lambda (1 + \beta t_H) - \sqrt{t_K - t_0} (1 + \beta t_K) \right]$	Снижено влияние изменения температуры ИС на линейность характеристики преобразования. Рабочая точка стабильна в области диффузионного окисления	Сложность конструктивной и схемной реализации
ИПТХД с термостабирующим температурой ИС	$\frac{E}{4} \left[ \frac{\beta(1 + \delta_R)Y_X + \delta_R + \beta(2\delta_R - \delta_S)Y_K}{\beta(1 + \delta_R)Y_X + \beta(\delta_S - \delta_R)Y_0 + \frac{\delta_R}{2} + \beta(1 + \delta_R - \frac{\delta_S}{2})Y_K} \right]$	Незначительное влияние изменения температуры ИС на температурную погрешность	Повышенная потребляемая мощность. Усложнение конструкции ПП. Уменьшенный ресурс ТХД. Нелинейность характеристики преобразования

В третьей главе рассмотрены пути совершенствования ТХД, ИПТХД и предложены новые способы построения ИП с регулированием температурного режима рабочих элементов ТХД, позволяющие существенно уменьшить температурную погрешность при измерении значительных концентраций горючих компонентов в пределах 500... 10000 ppm. Для каждой технической реализации рассматриваемых ИПТХД даны алгоритмы настройки.

Так, например, после введения в измерительный преобразователь (рис. 2, а) блока Д, осуществляющего деление выходного сигнала полумостовой схемы на ток, протекающий по элементам датчика, уменьшена нелинейность характеристики преобразователя и выходной сигнал описывается выражением

$$U_{\text{вых}} = \frac{R_0}{2} (\beta t_K (\delta_R - \delta_S) + \beta \cdot t_0 \cdot (\delta_R - \delta_S) - \beta t_X). \quad (4)$$

Данное техническое решение защищено патентом на полезную модель РБ и положено в основу измерителя объемной концентрации монооксида углерода в отходящих дымовых газах (ИКСОД-1), внешний вид которого показан на рис. 1, серийно освоенном на РУП «Гомельский ЗИП».

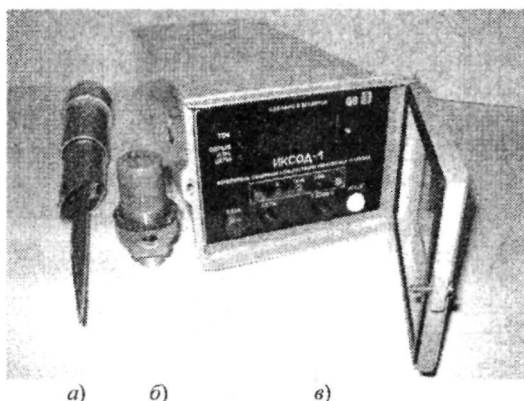


Рис. 1. ИКСОД-1: выносной зонд (а); первичный преобразователь (б); измерительный преобразователь (в)

Для уменьшения температурной погрешности было предложено в отмеченное выше техническое решение ввести множитель ( $U$ ) и три элемента оперативной настройки: R1, R2, R3, позволяющие настроить ИПТХД при крайних рабочих температурах ИС. На рис. 2, б приведен один из вариантов схемной реализации рассмотренного ИПТХД, выходной сигнал которого можно представить следующим образом:

$$U_{\text{и}} \sim R_0 \cdot \beta \cdot t_X. \quad (5)$$

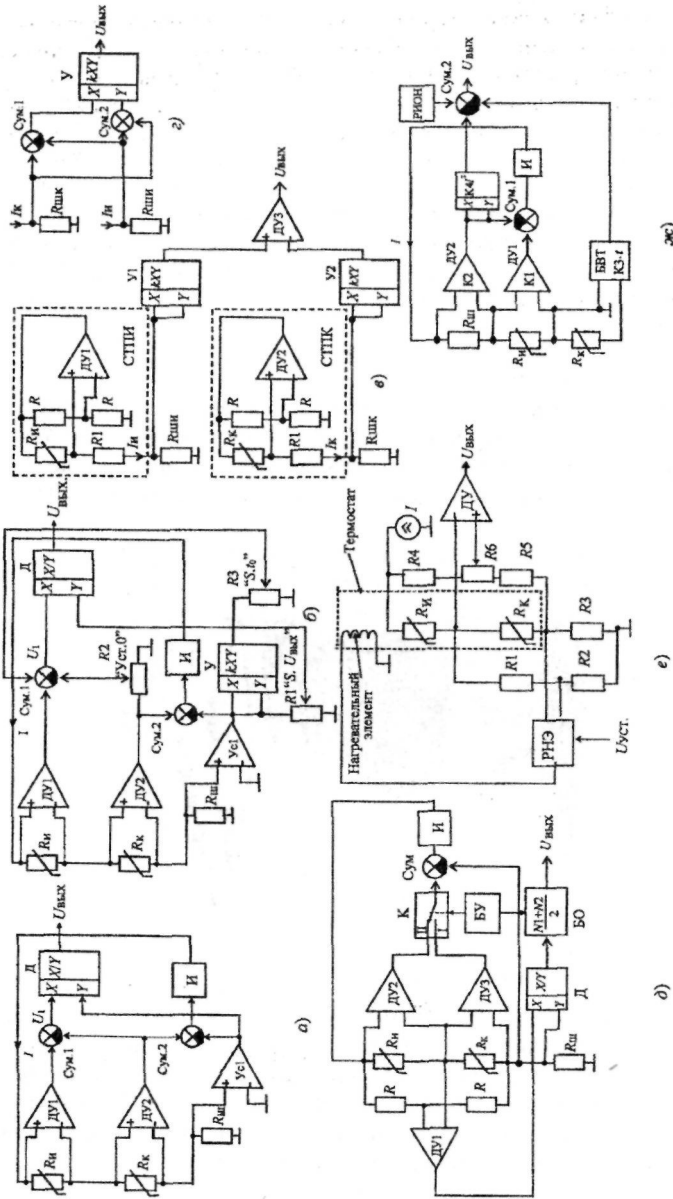


Рис. 2. Варианты измерительных преобразователей с уменьшенной дополнительной погрешностью на основе термохимических датчиков: с уменьшенной нелинейностью (а); с настройкой при двух температурах (б); повышенной температурной стабильности (в); упрощенный вариант в (г); с стабилизацией температур поверхностей ИЭ и КЭ и формированием полезного сигнала, используя два измерения (д); с каналом измерения температуры ИС и питанием измерительной мостовой схемы от источника тока (е); с каналом измерения температуры (ж)

Отмечено, что при небольших изменениях тока (80... 120 мА) через ИЭ и КЭ можно отказаться от использования умножителя  $U$ , так как квадрат тока практически линеен. В связи с этим была предложена упрощенная схема реализации описанного подхода, что не приведет к ухудшению метрологических характеристик ИПТХД.

Недостатком рассмотренных решений является отсутствие четкой стабилизации положения рабочей точки ИЭ в области диффузионного окисления. Для устранения этого недостатка предложено стабилизировать температуру ИЭ и КЭ, а информацию о концентрации горючих компонентов формировать в виде разности значений квадратов токов, протекающих по элементам ТХД:

$$U_{\text{ВЫХ}} \sim I_{\text{И}}^2 - I_{\text{К}}^2 = \frac{t_{\text{Х}}}{B_0}. \quad (6)$$

Варианты технической реализации данного способа представлены на рис. 2, в, г. Первый вариант (рис. 2, в) целесообразно применять при больших концентрациях горючих компонентов, а второй вариант (рис. 2, г) – при малых концентрациях, когда разность токов ИЭ и КЭ много меньше значения тока, протекающего по элементам датчика.

Приведены результаты экспериментального исследования рассмотренного способа, показывающие, что температурная погрешность оказалась равной 0,8 % на 10 °С (80 ppm на 10 °С) при изменении температуры ИС в диапазоне 20... 100 °С. Однако в этом случае предъявляются высокие требования к DA3, DA4 ввиду низкого уровня полезного сигнала на их входах.

Для снижения требований к отмеченным элементам предложено формировать выходной сигнал ИПТХД, используя мостовую измерительную схему и усредняя ее разбаланс между двумя измерениями (одно при стабилизации температуры поверхности КЭ, другое – ИЭ). При этом выходной сигнал можно записать следующим образом:

$$U_{\text{ВЫХ}} = R_0 (\delta_R - \beta \cdot \delta_S \cdot t_{\text{И}} + \frac{2\delta_R - \delta_S}{2} \beta \cdot t_{\text{К}} + \frac{2 + \delta_S}{2} \beta \cdot t_{\text{Х}}). \quad (7)$$

Полезный сигнал не зависит от изменения температуры ИС, а неидентичность элементов ТХД не нарушают метрологических характеристик ИП. Реализация предложенного технического решения представлена на рис. 2, д.

Для стационарных высокоточных ИПТХД предложен вариант формирования полезного сигнала с термостатированием ИС на основе моста,

питаемого тока. На рис. 2, *e* представлена схемная реализация, выражение выходного сигнала которой представлено в следующем виде:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{IR_0}{2} [\beta t_X (1 + \delta_R) + \delta(I, t_0, \delta_R, \delta_S, B_0)], \quad (8)$$

$$\delta(I, t_0, \delta_R, \delta_S, B_0) = \delta_R + \delta_R \beta t_0 + \beta I^2 B_0 (2\delta_R - \delta_S), \quad (9)$$

где  $\delta(I, t_0, \delta_R, \delta_S, B_0)$  – аддитивная составляющая погрешности, которую можно скомпенсировать при настройке с помощью R6.

Таким образом, предложенное техническое решение по сравнению с известными решениями моста, питаемого током, и ИПТХД с термостатированием температуры ИС позволяют избавиться от дополнительной погрешности, обусловленной изменением температуры ИС. К недостаткам следует отнести определенную конструктивную сложность ПП, уменьшение ресурса ТХД и дополнительную потребляемую мощность (10...20 Вт), обусловленную наличием термостата, в зависимости от диапазона изменения температуры ИС.

Для автономных ИПТХД предложено техническое решение (рис. 2, *жс*), в котором выходной сигнал формируется на основе следующего выражения:

$$t_X = t_{\text{И}} - t_0 - I^2 \cdot B_0. \quad (10)$$

При этом температура ИЭ поддерживается неизменной с помощью авторегуляторной схемы, а КЭ используется как термометр сопротивления. В этом случае несовершенства ТХД можно не учитывать, так как элементы датчика работают в разных условиях теплообмена, но при одинаковой температуре ИС. Выходной сигнал рассмотренной схемной реализации выглядит следующим образом:

$$U_{\text{ВЫХ}} = at_X = \frac{K4(R_{\text{ш}}K2)^2}{k \cdot Rt} t_X, \quad (11)$$

где  $a$  – коэффициент преобразования, который неизменен для определенного типа датчиков и режима работы измерительной схемы;  $K4$  – коэффициент пропорциональности перемножителя;  $k = 1/B_0$  – тепловое сопротивление измерительного элемента.

Полезный сигнал ИПТХД пропорционален приращению температуры на поверхности ИЭ, что и является мерой концентрации горючих компонентов. Таким образом, рассмотренный ИПТХД, по сравнению с известными, позволяет снизить потребляемую мощность в 2 раза и температурную погрешность без подбора параметров ИЭ и КЭ датчика в пару в широ-

ком диапазоне температур. Данное техническое решение защищено патентом на полезную модель РБ.

**В четвертой главе** показано, что на энергетических котлах концентрация монооксида углерода в режимном сечении 200...300 ppm является оптимальной, а известные приборы имеют диапазон измерения 400... 10000 ppm, чего явно недостаточно.

Рассмотрены методы повышения чувствительности первичных и измерительных преобразователей на основе ТХД при структурных изменениях датчика и при импульсном питании датчика. Однако чувствительность этих методов ограничена наличием контактных явлений и линий связи между ПП и ИП. Предложен усилитель повышенной чувствительности для параметрических датчиков, основанный на питании датчика прямоугольными разнополярными импульсами напряжения, частота которых кратна промышленной, и осреднению сигнала разбаланса моста, благодаря чему достигнут коэффициент усиления в несколько десятков тысяч раз и значительно снижено влияние помех промышленной частоты и контактных явлений на результат измерения.

Показано, что в широком диапазоне температур ИС (150...350 °С) известная математическая модель элементов ТХД с постоянством терморезистивного коэффициента (ТРК) неадекватно описывает поведение ИЭ и КЭ, в связи с чем на основе экспериментальных исследований ТХД автором предложена новая математическая модель ТХД с линейно зависящим ТРК от  $t$  и  $t_0$ . Приведены методика и алгоритм действий для нахождения численных значений коэффициентов в выражении для ТРК:

$$B = B_0(1 - Ct_0 + At), \quad (12)$$

где  $B_0$ ,  $A$ ,  $C$  – постоянные коэффициенты аппроксимирующей зависимости ТРК.

При наличии ПЭВМ аппроксимацию ТРК можно провести любым из известных способов при наличии хотя бы трех точек ВАХ, причем одна из них должна быть снята при другой температуре ИС. Например, для конкретного экземпляра ТХД типа ТКС-1, ТРК выглядит следующим образом:

$$B = 1,919 \cdot 10^4(1 + 1,477 \cdot 10^{-4} \cdot t - 1,385 \cdot 10^{-3} \cdot t_0). \quad (13)$$

С учетом выражений (2) и (12) можно записать следующее:

$$\begin{cases} I^2 \cdot B_{\text{ИЭ}}(1 + A_{\text{И}}t_{\text{И}} - C_{\text{И}}t_0) = t_{\text{И}} - t_0 - t_{\text{Х}}, \\ I^2 \cdot B_{\text{ЭК}}(1 + A_{\text{К}}t_{\text{К}} - C_{\text{К}}t_0) = t_{\text{К}} - t_0, \end{cases} \quad (14)$$

где  $B_{\text{ИЭ}}$  ( $B_{\text{ЭК}}$ ),  $A_{\text{И}}$  ( $A_{\text{К}}$ ),  $C_{\text{И}}$  ( $C_{\text{К}}$ ) – коэффициенты аппроксимирующей функции ТРК для ИЭ (КЭ).

На рис. 3 представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований ТХД типа ТКС-1, откуда видно, что новая математическая модель ТХД с линейно изменяющимся ТРК более чем в 3 раза точнее описывает поведение термозлемента ТХД, чем известная.

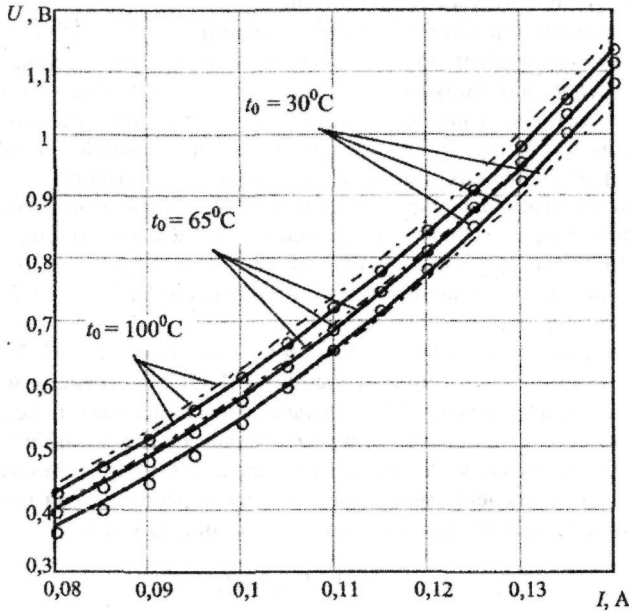


Рис. 3. ВАХ элемента ТХД ТКС-1 при различных температурах ИС:  
 ○ ○ ○ — экспериментальные;  
 - - - - - рассчитанные при условии постоянства ТРК;  
 — — — — — рассчитанные при условии линейной зависимости ТРК (12)

С учетом неидентичности элементов ТХД, система уравнений (14) может быть представлена в виде:

$$\begin{cases} I^2 \cdot B_0(1 + At_{И} - Ct_0) = t_{И} - t_0 - t_X, \\ I^2 \cdot B_0(1 + \delta_B)(1 + A(1 + \delta_A)t_K - C(1 + \delta_C)t_0) = t_K - t_0, \end{cases} \quad (15)$$

где  $\delta_B$ ,  $\delta_A$ ,  $\delta_C$  — отличия в значениях терморезистивных коэффициентов  $B_0$ ,  $A$  и  $C$  соответственно для ИЭ и КЭ датчика. По экспериментальным исследованиям партии ТХД ТКС-1 из 9 штук, рассмотренные отличия не превышают следующих значений:  $\delta_B$  — 8 %,  $\delta_A$  — 30 % и  $\delta_C$  — 7 %.

Соответственно выражения для температур, сопротивлений и напряжений для элементов ТХД будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} t_{И} = \frac{I^2 \cdot B_0(1 - Ct_0) + t_0 + t_X}{1 - AI^2 \cdot B_0}, \\ t_{К} = \frac{I^2 \cdot B_0(1 + \delta_B)(1 - C(1 + \delta_C)t_0) + t_0}{1 - AI^2 B_0(1 + \delta_B)(1 + \delta_A)}; \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} R_{И} = R_0(1 + \beta \frac{I^2 \cdot B_0(1 - Ct_0) + t_0 + t_X}{1 - AI^2 B_0}), \\ R_{К} = R_0(1 + \delta_R)(1 + \beta \frac{I^2 \cdot B_0(1 + \delta_B)(1 - C(1 + \delta_C)t_0) + t_0}{1 - AI^2 B_0(1 + \delta_B)(1 + \delta_A)}); \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} U_{И} = IR_0(1 + \beta \frac{I^2 \cdot B_0(1 - Ct_0) + t_0 + t_X}{1 - AI^2 B_0}), \\ U_{К} = IR_0(1 + \delta_R)(1 + \beta \frac{I^2 \cdot B_0(1 + \delta_B)(1 - C(1 + \delta_C)t_0) + t_0}{1 - AI^2 B_0(1 + \delta_B)(1 + \delta_A)}). \end{cases} \quad (18)$$

Полученная математическая модель ТХД позволяет более адекватно описывать поведение ТХД в расширенной области рабочих температур датчика, а предложенные методика и алгоритм позволяют автоматизировать процесс нахождения ТРК для реального датчика по его ВАХ. При этом учитываются все составляющие термоэлемента ТХД.

Предложена техническая реализация ИПТХД, основанная на математической модели ТХД (16-18) и двухканальной схеме построения ИП с каналом измерения температуры ИС с помощью КЭ и отмеченного усилителя повышенной чувствительности для параметрических датчиков (УПЧ).

Предложена структурная схема ГСКУ повышенной точности (рис. 4), состоящая из двух основных блоков: ПП, включающего в себя ТХД и нагревательный элемент реакционной камеры (НЭ), и ИП, включающего в себя блок питания (БП), блок управления исполнительными устройствами (БУИУ), блок сигнализации (БС), индикатор (И), регулятор нагревательного элемента (РНЭ) и элементы, образующие вышеуказанный ИПТХД.

Выходной сигнал ИП описывается выражением следующего вида:

$$\Delta U = K_{И} I_P R_{0И} b \varepsilon \frac{\gamma(b-1) + 2\varepsilon a}{\gamma - 2\varepsilon t_1 - \varepsilon \Delta t_{\max}} (\Delta t_{\max} - \Delta t) \Delta t, \quad (19)$$



где  $a = \frac{t_0(1 - CI_P^2 B_0)}{1 - AI_P^2 B_0}$ ,  $b = \frac{I_P^2 B_0}{1 - AI_P^2 B_0}$ ;  $K_{И}$  – коэффициенты усиления измерительного канала;  $\Delta t_{\max}$  – диапазон температур ПП;  $t_1$  – начальная температура диапазона;  $\Delta t$  – текущее значение прироста температуры внутри диапазона;  $\gamma = 3,9083 \cdot 10^{-3}$  – линейный член ТКС платины для интервала температур от 0 до 600 °С;  $\varepsilon = 5,775 \cdot 10^{-7}$  – квадратичный член ТКС платины для интервала температур от 0 до 600 °С;  $R_{ОИ}$  – начальное сопротивление ИЭ.

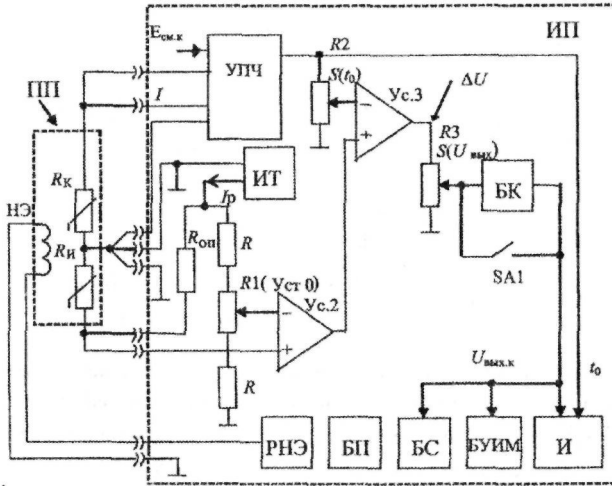


Рис. 4. Структурная схема ГСКУ повышенной точности

Из выражения (19) было определено, что максимальный уход нулевой точки ИПТХД имеет место в середине диапазона  $\Delta t_{\max}$ . Экспериментальное подтверждение расчетных метрологических характеристик дает основание применять рассмотренный метод построения ИП для построения газоаналитических систем высокой чувствительности в расширенном температурном диапазоне температур ИС. Для ТХД ТКС-1 при диапазоне  $\Delta t_{\max} = 100$  °С температурный дрейф составил 80 ppм при чувствительности 0,5 мВ/ppм. Однако уменьшение  $\Delta t_{\max}$  в 2 раза позволит его ослабить в 4 раза. Разработан и исследован способ коррекции температурного дрейфа до 30 ppм в диапазоне  $\Delta t_{\max} = 200$  °С. Это позволяет на основе рассмотренной ГСКУ проектировать средства контроля ПДК горючих компонентов.

Приведены результаты экспериментального исследования предложенного технического решения в реальных условиях эксплуатации на паровом котле Е1/9.

Для более существенного уменьшения температурной погрешности с одновременным повышением чувствительности, кроме вышерассмотрен-

ного способа построения ИП, для упрощения процедуры настройки при построении стационарных газоанализаторов и сигнализаторов горючих компонентов предложен вариант ИПТХД с термостатированием температуры ИС внутри реакционной камеры.

Предложенный способ построения ИПТХД позволяет существенно снизить требования к стабильности термостатирования ИС. Например, уменьшая диапазон настройки  $t_{\text{MAX}}$  в 10 раз, требования к термостатированию ИС должны находиться на уровне  $\pm 10$  °С, что вполне реализуемо. При этом дополнительная погрешность от изменения температуры ИС составит  $\pm 1...2$  ppm.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с поставленной целью для проверки выдвинутой гипотезы в диссертации получены следующие основные результаты:

1. Предложена математическая модель термохимических датчиков, учитывающая неидентичность их элементов [6], [7], позволившая проанализировать влияние технологических несовершенств ТХД на дополнительную погрешность известных измерительных схем для термохимических датчиков [4], [7].

2. Определены пути уменьшения влияния технологических несовершенств ТХД на полезный сигнал измерительных преобразователей [7] и предложены новые технические решения [11], [12], основанные на управлении температурными режимами термохимических датчиков за счет введения дополнительных функциональных узлов [1], [3], [4], [5], [8], [9].

3. Разработана и экспериментально подтверждена математическая модель элементов ТХД с линейно зависимым терморезистивным коэффициентом от рабочих температур термоэлемента [2], на основе которой предложены методика и алгоритм определения основных технических характеристик ТХД по их ВАХ, позволяющие осуществлять инженерный расчет ИПТХД [1], [6], [10].

4. Разработаны и экспериментально исследованы новые способы построения измерительных преобразователей повышенной чувствительности с нетрадиционным включением элементов термохимических датчиков, позволяющие достичь чувствительности электрохимического метода детектирования [1], [12] и пригодные для построения высокоточных газоаналитических систем контроля и управления процессами сжигания топлива в теплоэнергетических установках, которые позволяют экономить его до 3...5 %.

5. Разработан и освоен в серийном производстве РУП «Гомельский ЗИП» измеритель объемной концентрации монооксида углерода в отходящих дымовых газах теплоэнергетических установок (ИКСОД-1) на основе измерительного преобразователя с уменьшенной нелинейностью преобразования и стабилизацией температуры в реакционной камере ТХД [4], [11].

## **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Карпов В. А., Ковалев А.В., Ратько А.И., Мальченко Н.С. Термохимический газоанализатор повышенной чувствительности для систем контроля и управления сжиганием // Доклады НАН Беларуси. - 2006. - Т. 50, № 2. - С. 92-95.
2. Ковалев А.В. Экспериментальное исследование постоянства терморезистивного коэффициента в расширенном интервале рабочих температур // Веста. ГГТУ им. П.О. Сухого. - 2004. - № 2. - Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2004. - С. 31-38.
3. Ковалев А.В., Карпов В.А. Измерительный усилитель повышенной чувствительности для термохимического датчика // Вестн. ГГТУ им. П.О. Сухого. - 2006. - № 1. - Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2006. - С. 57-60.
4. Ковалев А.В., Карпов В.А., Мурашко С.А. Измеритель концентрации горючих компонентов на основе термохимического датчика // Поиски и освоение нефтяных ресурсов Республики Беларусь: Сб. науч. трудов. - Вып. 4. - Гомель: БелНИПИнефть, 2001. - С. 327-332.
5. Ковалев А.В., Карпов В.А., Мурашко С.А. Термоконвективный микрорасходомер повышенной чувствительности // Поиски и освоение нефтяных ресурсов Республики Беларусь: Сб. науч. трудов. - Вып. 4. - Гомель: БелНИПИнефть, 2001. - С. 321-326.
6. Карпов В.А., Козусев Ю.А., Ковалев А.В. Определение технических параметров термокаталитических датчиков, необходимых для расчета измерительных схем // Современные проблемы машиноведения: Материалы II междунар. науч.-техн. конф. - Гомель: ГПИ им. П.О. Сухого, 1998. - Т. 2. - С. 150-152.
7. Ковалев А.В., Мурашко С.А. Погрешности измерительных цепей металлических терморезисторных преобразователей // Современные проблемы машиноведения: Материалы III междунар. науч.-техн. конф. - Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2000.- Т. 2. - С. 217-219.
8. Карпов В.А., Ковалев А.В. Измерительные преобразователи для термохимических датчиков повышенной температурной стабильности // Современные проблемы машиноведения: Материалы III междунар. науч.-техн. конф. - Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2000.- Т. 2. - С. 214-216.
9. Карпов В.А., Ковалев А.В. Термохимический газоанализатор с уменьшенным влиянием технологических несовершенств датчика на погрешность измерения // Современные проблемы машиноведения: Тез. докладов V междунар. науч.-техн. конф., 1-2 июля 2004 г. - Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого 2004. - С. 115-116.

10. Карпов В.А., Ковалев А.В. Термохимический газоанализатор для расширенного температурного диапазона измеряемой среды // Современные проблемы машиноведения: Тез. докладов V междунар. науч.-техн. конф., 1-2 июля 2004 г. - Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2004. - С. 116-117.

11. Пат. ВУ 676 U, МПК G01N 27/16. Термохимический газоанализатор / Карпов В.А., Ковалев А.В., Мальченко С.Н. - № 676; Заявл. 11.01.2002; Опубл. 30.09.2002 // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. - 2002. - № 3.

12. Пат. ВУ 896 U, МПК G01N 27/16. Термохимический газоанализатор / Карпов В.А., Ковалев А.В. - № 896; Заявл. 31.10.2002; Опубл. 30.06.2003 // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. - 2003. - № 2.

## РЕЗЮМЕ

**Ковалев Алексей Викторович**

### **Повышение точности газоаналитических систем контроля и управления путем регулирования температурного режима термохимических датчиков**

**Ключевые слова:** газоаналитическая система контроля и управления, термохимический датчик (ТХД), измерительный преобразователь для термохимического датчика, точность, температурная погрешность.

Объект исследования - газоаналитическая система контроля и управления (ГСКУ).

**Предмет исследования** - первичные и измерительные преобразователи на основе термохимических датчиков.

**Цель исследования** - разработка способов повышения точности элементов ГСКУ, в частности, первичных и измерительных преобразователей, за счет регулирования температурного режима термохимических датчиков.

Методологической основой исследований являются традиционные методы алгебры, математического анализа с применением ПЭВМ и аппарат анализа электронных цепей.

Построена математическая модель термохимических датчиков, учитывающая неидентичность их элементов, и впервые проанализировано влияние технологических несовершенств ТХД на результат преобразования известных измерительных преобразователей на их основе. Разработаны методика и алгоритм определения параметров и математическая модель элементов ТХД, необходимые для инженерного расчета измерительных преобразователей в расширенном температурном диапазоне. Определены пути совершенствования первичных и измерительных преобразователей для ГСКУ в узком и расширенном температурном диапазоне измеряемых воздушных сред за счет регулирования температурных режимов ТХД, что позволило уменьшить температурные погрешности и повысить чувствительность термохимического принципа детектирования горючих газов до уровня электрохимических средств обнаружения. Предложены измерительные преобразователи и способы формирования полезной информации с использованием ТХД, обладающие малыми температурными погрешностями и основанные на измерении температуры внутри реакционной камеры ТХД, для систем оптимизации процессов сжигания топлива в теплоэнергетических установках.

**Результаты работы** внедрены в измерителе концентрации монооксида углерода в отходящих дымовых газах теплоэнергетических установок (ИКСОД-1), серийно освоенном на РУП «Гомельский ЗИП».

Область применения результатов диссертации - организации и предприятия, занимающиеся разработкой и производством измерительных преобразователей для термохимических датчиков в составе ГСКУ.

## РЭЗЮМЭ

### Кавалеў Аляксей Віктаравіч

#### Павышэнне дакладнасці элементаў газааналітычных сістэм кантролю і кіравання шляхам рэгулявання тэмпературнага рэжыма тэрмахімічных датчыкаў

**Ключавыя словы:** газааналітычная сістэма кантролю і кіравання, тэрмахімічны датчык (ТХД), вымяральны пераўтваральнік для тэрмахімічнага датчыка, дакладнасць, тэмпературная хібнасць.

**Аб'ект даследавання** - газааналітычная сістэма кантролю і кіравання (ГСКК).

**Прадмет даследавання** - першасныя і вымяральныя пераўтваральнікі на аснове тэрмахімічных датчыкаў.

**Мэта даследавання** - распрацоўка спосабаў павышэння дакладнасці элементаў ГСКК, у прыватнасці, першасных і вымяральных пераўтваральнікаў, за кошт рэгулявання тэмпературнага рэжыма тэрмахімічных датчыкаў.

Метадалагічнай асновай даследавання з'яўляюцца традыцыйныя метады алгебры, матэматычнага аналізу з выкарыстоўваннем ПЭВМ і апарата аналізу электронных ланцугоў.

Пабудавана матэматычная мадэль тэрмахімічных датчыкаў, якая ўлічвае неідэнтычнасць іх элементаў, і ўпершыню прааналізаваны ўплыў тэхналагічных неўдасканаленняў ТХД на вынік пераўтварэння вядомых вымяральных пераўтваральнікаў на іх аснове. Распрацаваны метадыка і алгарытм вызначэння параметраў і матэматычная мадэль элементаў ТХД, неабходныя для інжэернага разліку вымяральных пераўтваральнікаў у пашыраным тэмпературным дыяпазоне. Вызначаны шляхі ўдасканалення першасных і вымяральных пераўтваральнікаў для ГСКК у вузкім і пашыраным тэмпературным дыяпазоне вымяраемых паветраных асяроддзяў за кошт рэгулявання тэмпературных рэжымаў ТХД, што пазволіла паменшыць тэмпературныя хібнасці і павысіць адчувальнасць тэрмахімічнага прынцыпа дэтэктавання гаручых газаў да ўзроўню электрахімічных сродкаў вынаходніцтва. Прапанаваны вымяральныя пераўтваральнікі і спосабы фарміравання карыснай інфармацыі з выкарыстаннем ТХД, якія маюць малыя тэмпературныя хібнасці і заснаваны на вымярэнні тэмпературы ўнутры рэакцыйнай камеры ТХД, для сістэм аптымізацыі працэсаў спальвання паліва ў тэплаэнэргетычных устаноўках.

**Вынікі працы** ўкаранены ў вымяральніку канцэнтрацыі монааксіда вуглерода ў адыходзячых дымавых газах тэплаэнэргетычных устаноў (ЙКСОД-1) вытворчасці РУП «Гомельскі ЗВП».

Галіна выкарыстоўвання вынікаў дысертацыі - арганізацыі і прадпрыемствы, якія займаюцца распрацоўкай і вырабам вымяральных пераўтваральнікаў для тэрмахімічных датчыкаў у складзе ГСКК.

## SUMMARY

**Kovalev Aleksey Viktorovich**

### **Increase of accuracy of gas analyzing systems of monitoring and control by regulation of temperature schedules of thermochemical sensors**

**Key words:** the gas analyzing system monitoring and control, thermochemical sensor, measuring transducer for the thermochemical sensor, accuracy, temperature error.

**Object of research** - gas analyzing system monitoring and control.

**Subject of research** - primary and measuring transducers on the basis of thermo chemical sensors.

**The purpose of research** - the development of ways to increase the accuracy of gas analyzing system monitoring and control elements and primary and measuring transducers, in particular, at the expense of regulation of thermochemical sensors temperature schedule.

The methodological basis of research are the conventional methods of algebra, calculus with application of electronic calculation machines and the machine of the electronic circuits analysis.

There has been formed a mathematical model of thermochemical sensors taking into account the non-identity of their elements and for the first time the impact of technological imperfections thermochemical sensors temperature schedule on the outcome of transformation of the known measuring transducers on their basis has been analyzed. There have been developed both the technique and the algorithm of parameters definition and the mathematical model of elements thermochemical sensors temperature schedule, necessary for engineering calculation of measuring transducers in an extended temperature range. The ways of primary and measuring transducers improvement for gas analyzing system monitoring and control in a narrow and extended temperature range of measured air mediums have been determined at the expense of regulation of temperature schedules thermochemical sensors, that made it possible to reduce temperature errors and to increase the sensitivity of a thermochemical principle of detecting of combustion gases up to the level of electrochemical means of detection. The measuring transducers and the ways of formation of useful information with the use of thermochemical sensors, having small temperature errors and founded on the temperature measurement inside a soaking chamber of thermochemical sensors, for the systems of processes optimization of burning of fuel in the heat and power engineering plants are offered.

**The outcomes** of activity are implemented into the measuring device of the concentration of carbon monoxide in damp smoke gases from the heat power engineering plants, produced by the Gomel PMD.

The field of the application of the thesis results are organizations and firms engaged in the development and production of measuring transducers for thermochemical sensors in the structure of gas analyzing system monitoring and control.

Научное издание

**Ковалев Алексей Викторович**

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ  
ГАЗОАНАЛИТИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ  
И УПРАВЛЕНИЯ ПУТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ  
ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА  
ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ**

05.13.05 - Элементы и устройства вычислительной техники  
и систем управления

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

Редактор *Л.Ф. Теплякова*  
Компьютерная верстка *Н. В. Широглазова*

Подписано в печать 25.05.06.  
Формат 60x84/<sub>16</sub> Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Ризография. Усл. печ. л. 1,27. Уч.-изд. л. 1,51.  
Тираж 100 экз. Заказ № 126 /98.

Издательский центр  
Учреждения образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П.О. Сухого».  
ЛИ № 02330/0133207 от 30.04.2004 г.  
246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.

Отпечатано на ризографическом оборудовании  
Учреждения образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П.О. Сухого».  
246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.