

**МЕТОДОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО  
СОСТОЯНИЯ ПРОХОДНЫХ ПЕЧЕЙ**

**Е.М. Томилин  
Н.И. Чичикало**

**Е.М. Томилин  
Н.И. Чичикало**

***МЕТОДОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ  
ПРОХОДНЫХ ПЕЧЕЙ***

**Е.М. Томилин, Н.И. Чичикало**

**МЕТОДОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ  
ПРОХОДНЫХ ПЕЧЕЙ**

**ИЗДАТЕЛЬСТВО «Ноулидж»  
ДОНЕЦКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
Донецк 2011**

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ТИПОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧЕЙ. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУР АКТИВНОЙ ЗОНЫ.....	8
1.1. Анализ типов промышленных печей .....	8
1.2. Анализ способов и средств измерения температур активной зоны тепловых агрегатов.....	13
1.3. Анализ источников погрешностей измерения температур в проходных печах.....	30
1.4. Анализ существующих решений в области ИИС контроля температур тепловых агрегатов.....	32
1.5. Классификация методов моделирования тепловых процессов и функций, выполняемых сертифицированными устройствами. Выводы к главе 1.....	48
ГЛАВА 2. ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПРОФИЛЯ ИССЛЕДУЕМОГО ТЕПЛОВОГО АГРЕГАТА.....	50
2.1. Методика определения геометрических угловых коэффициентов излучения объемных зон.....	50
2.2. Оценка результатов применения методики определения геометрических угловых коэффициентов излучения объемных зон.....	72
2.3. Алгоритм учета влияющих факторов в газовых зонах на процессы теплообмена проходной печи.....	77
2.4. Построение математической модели теплового агрегата. Выводы к главе 2.....	79
ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТЕМПЕРАТУР В ТТИ. МЕТОДИКА КОСВЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР....	98
3.1. Методика косвенного измерения температур внутренней стороны поверхности кладки.....	98
3.2. Методика оценки температур в ТТИ.....	112
ГЛАВА 4. ПОСТРОЕНИЕ ИИС ОЦЕНКИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПРОФИЛЯ ПРОХОДНОЙ ПЕЧИ.....	127
4.1. Структура ИИС оценки температурного профиля проходной печи на базе сертифицированных устройств.....	127

4.2. Оценка метрологических характеристик компонентов ИИС оценки температурного профиля и методики косвенного измерения температур кладки теплового агрегата.....	142
4.3. Пример виртуальной ИИС оценки температурного профиля проходной печи.....	151
4.4. Результаты испытаний. Оценка систематической составляющей методической погрешности определения температур поверхностей заготовок. Выводы к разделу 4.....	157
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	168
Список использованных источников.....	171
Приложение А. Листинг программ блоков виртуальной ИИС...	181

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АСНИ – автоматизированная система научных исследований;  
АЦП – аналого-цифровой преобразователь;  
а.ч.т. – абсолютно черное тело;  
ИИС – информационно-измерительная система;  
ИК – инфракрасный;  
ИП – измерительный преобразователь;  
ОС – операционная система;  
ПО – программное обеспечение;  
СИ – средство измерения;  
ТВС – тепловизионная система;  
ТКС – температурный коэффициент сопротивления;  
ТП – термопара;  
ТПП – термопара платинородий-платиновая;  
ТПР – термопара платинородий-платинородиевая;  
ТПС – термопреобразователи сопротивления;  
ТСМ – термопреобразователь сопротивления медный;  
ТСП – термопреобразователь сопротивления платиновый;  
ТТИ – технологическая точка измерения;  
ТХА – термопара хромель-алюмелевая;  
ТХК – термопара хромель-копелевая;  
ЧЭ – чувствительный элемент.

## ВВЕДЕНИЕ

В книге изложен материал, полученный на основе моделирования по известным методикам теплотехнических процессов, протекающих в проходных печах. Рассмотрены особенности, связанные с измерением и контролем температур внутри тепловых агрегатов. Предложены новые методы повышения точности определения температур активной зоны туннельных печей. Приведен анализ существующих решений в области автоматизации промышленных тепловых агрегатов.

Современный, уровень развития науки и техники требует соответствующего уровня развития приборостроения. Существует много физических величин, которые необходимо измерять и контролировать. Температура, среди них, остается одной из главных. Это физическая величина, которая характеризует состояние термодинамического равновесия системы.

На сегодняшний день в научных исследованиях и производственной практике сложилась такая ситуация, при которой одним из эффективных способов повышения точности измерения и контроля температуры является применение информационно-измерительных систем (ИИС), содержащих в своем составе современные средства электронной и вычислительной техники, различные сертифицированные устройства, виртуальные приборы.

Важной народно-хозяйственной задачей является повышение качества изделий, подвергаемых термической обработке. Одной из задач металлургической промышленности является задача повышения точности определения температур поверхности заготовок внутри активной зоны проходных печей.

В большинстве случаев, необходимой точности определения температур поверхностей заготовок удастся достичь лишь в зоне заключительного нагрева. Наибольшая погрешность имеет место при определении температур поверхности заготовок в зоне предварительного нагрева. Решение задачи усложняется наличием сложной газовой излучающе-поглощающей среды, радиационно-конвективным характером нагрева тел, множественными переотражениями излучения во внутреннем пространстве теплового агрегата, зависимостью геометрии активной зоны от размеров нагреваемых тел.

Повышение точности определения температур внутри активной зоны проходных печей может быть выполнено путем построения ИИС оценки температурного профиля на базе виртуальных моделей и сертифицированных устройств, выполняющей коррекцию систематической составляющей методической погрешности определения температур активной зоны. ИИС осуществляет определение температурного профиля теплового агрегата, а также находит значения температур в технологических точках измерения (ТТИ) с использованием математического аппарата моделирования стационарного теплообмена. Оценивание систематической составляющей методической погрешности измерения осуществляется путем сравнения значений температур в ТТИ и значений температур поверхности заготовок в установившемся режиме.

Повышение точности измерения температур внутреннего пространства проходных печей способствует снижению выхода бракованной продукции и повышению качества изделий.

# ГЛАВА 1

## АНАЛИЗ ТИПОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧЕЙ. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУР АКТИВНОЙ ЗОНЫ

### 1.1. Анализ типов промышленных печей

В основе многих технологических процессов лежит тепловая обработка материалов и изделий: нагрев и плавление металлов, обжиг строительных и огнеупорных материалов, фарфора, получение вяжущих материалов (цементного клинкера, извести, гипса), стекла, термическая переработка топлива и так далее. Тепловая обработка материалов и изделий осуществляется в технологических или энерготехнологических агрегатах – промышленных печах. Она сопровождается процессами тепломассообмена [1].

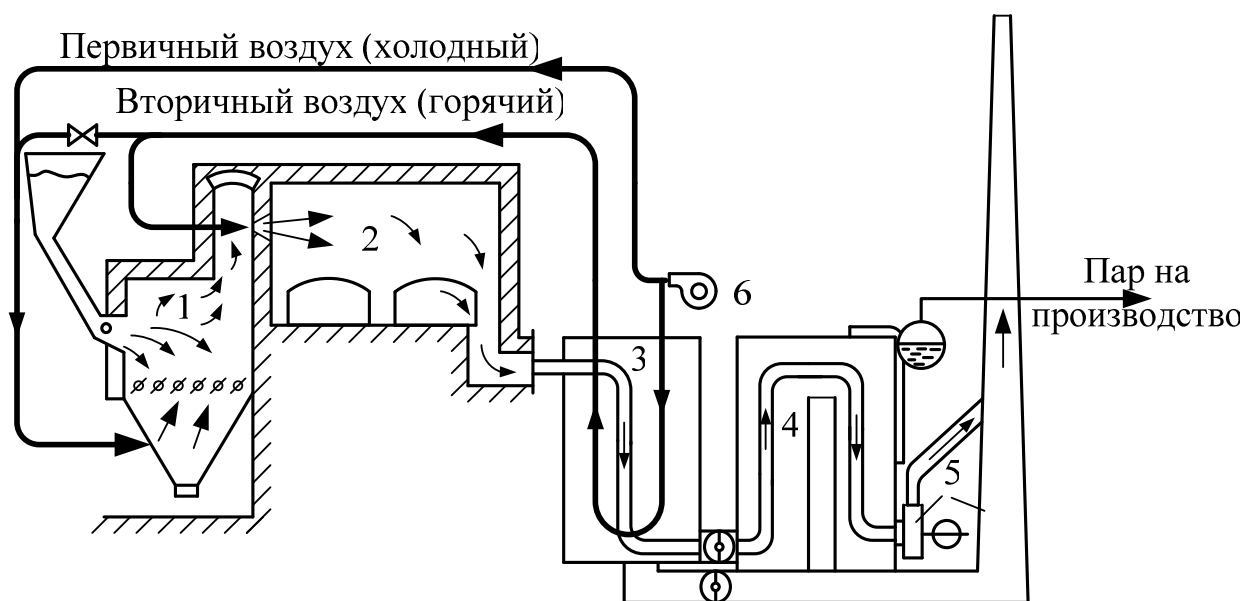


Рис. 1.1. Схема общего устройства печи

На рис. 1.1 обозначены: 1 – топочное устройство; 2 – рабочее пространство; 3 – регенеративное устройство; 4 – котел-утилизатор; 5 – дымосос; 6 – вентилятор [2].

Проходная печь – это промышленная печь непрерывного действия для нагрева штучных изделий с механизированным транспортированием изделий через печь. Проходные печи применяют при термообработке изделий и деталей, при обжиге керамических, эмалированных металлических изделий, для нагрева металлических



заготовок перед горячей обработкой давлением и так далее [3]. Рабочее пространство большинства проходных печей имеет большие размеры в продольном сечении (длина некоторых печей может достигать 250 м), однако сравнительно малые в поперечном сечении (ширина 1-6 м, иногда до 25 м, а высота 1-2 м).

Тепловой режим проходной печи постоянный по времени и переменный по длине печи. Температурный режим – одинаковая температура в каждом поперечном сечении, а по длине печи – либо одинаковая, либо переменная.

Проходная печь обогревается многочисленными небольшими источниками тепла, расположенными главным образом на продольных стенах, а в ряде случаев на своде и поде [4].

При отоплении газом (нагрев изделий выше 700 °С) или при отоплении мазутом (нагрев выше 1000 °С) топливо сжигают непосредственно в рабочем пространстве проходной печи.

В случае высокотемпературного нагрева газом с низкой теплотой сгорания применяют подогрев газа или воздуха. В работе [5] приводится пример схемы системы управления параметрами горения в проходной печи.

Проходная печь с атмосферой контролируемого состава или печи, в которых изделия не должны соприкасаться с продуктами сгорания топлива, обогревают радиационными трубами или электрическими нагревателями сопротивления.

Удельная продолжительность нагрева в проходных печах (кроме секционных) при температуре нагрева 700-1150 °С 10-15 мин на 1 см толщины нагреваемого изделия, а в секционных печах 1-3 мин/см [3].

Тепловая мощность проходной печи на 1 м<sup>2</sup> площади пода при температуре нагрева до 300 °С около 200 кВт, а при более высокой температуре до 300 кВт [6].

Классификационная схема существующих типов печей представлена на рис. 1.2 [2].

Необходимый для горения воздух подогревается за счет тепла остывающих изделий, поступаая из зоны охлаждения. Продукты горения и изделия движутся в рабочем пространстве туннеля в противотоке. Чаще всего передача тепла от изделий к воздуху осуществляется путем непосредственного контакта, то есть по способу нагрева – это печи с прямым нагревом. Горячий воздух из зоны охлаждения идет в топку для горения топлива, а некоторая часть

воздуха проходит по туннелю в зону горения и служит для дожигания ДЫМОВЫХ ГАЗОВ.

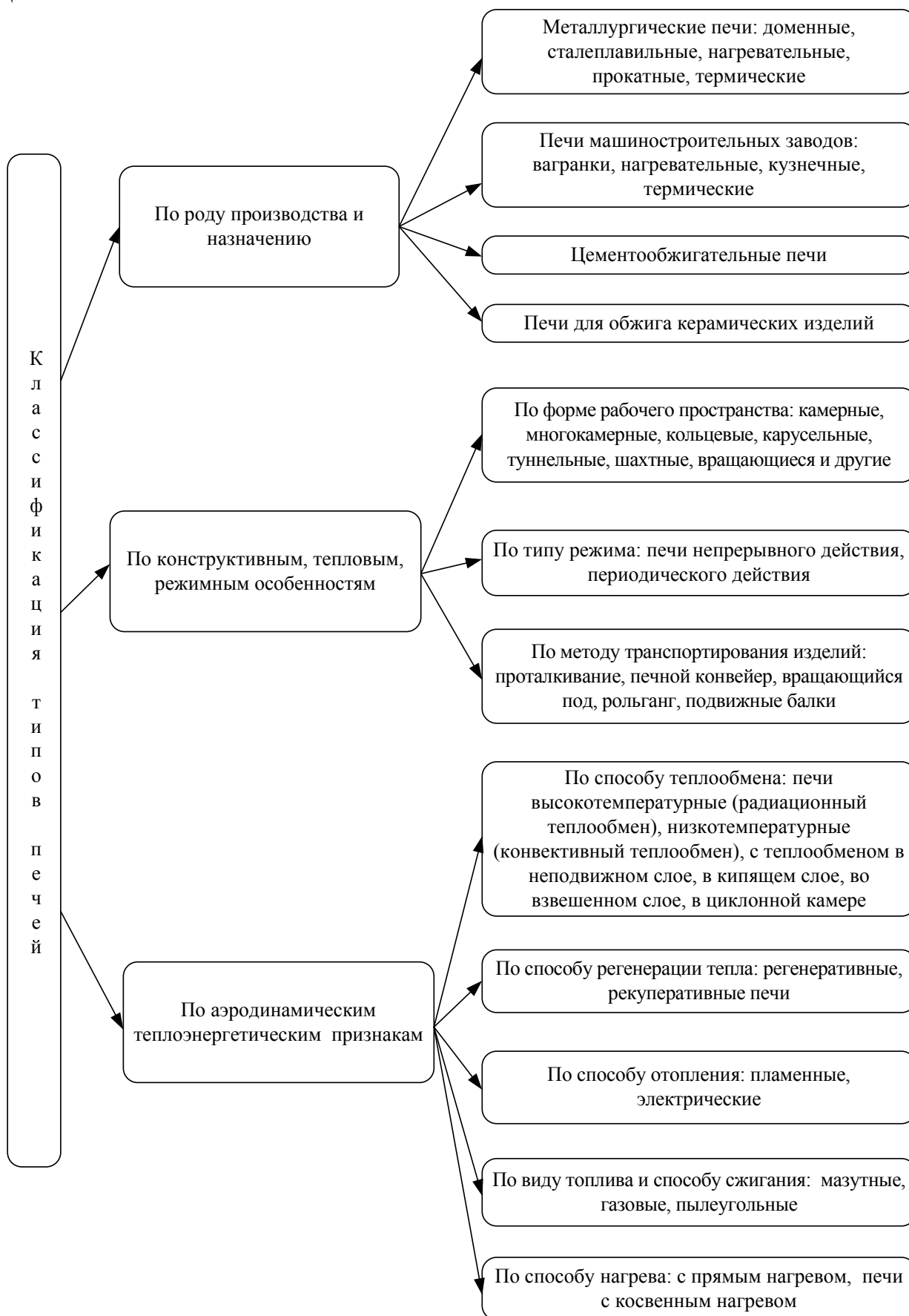


Рис. 1.2. Классификационная схема печей

Проходная печь представляет собой длинный (до 80-120 м) туннель, по которому движется поезд из вагонеток, нагруженных обрабатываемыми изделиями. Печь по длине разбивается на зону подогрева, зону высоких температур и зону охлаждения.

По такому же принципу работают кольцевые и многокамерные печи силикатной промышленности [3].

В исходные данные для построения ИИС оценки температурного состояния теплового агрегата должны входить: геометрические размеры активной зоны печи; тип, характеристики и количество сжигаемого топлива; параметры процесса горения; характеристики и параметры тел, подвергаемых тепловой обработке; теплотехнические параметры печи и материалов из которых она построена.

Под температурным профилем теплового агрегата понимается распределение температур в активной зоне по её длине.

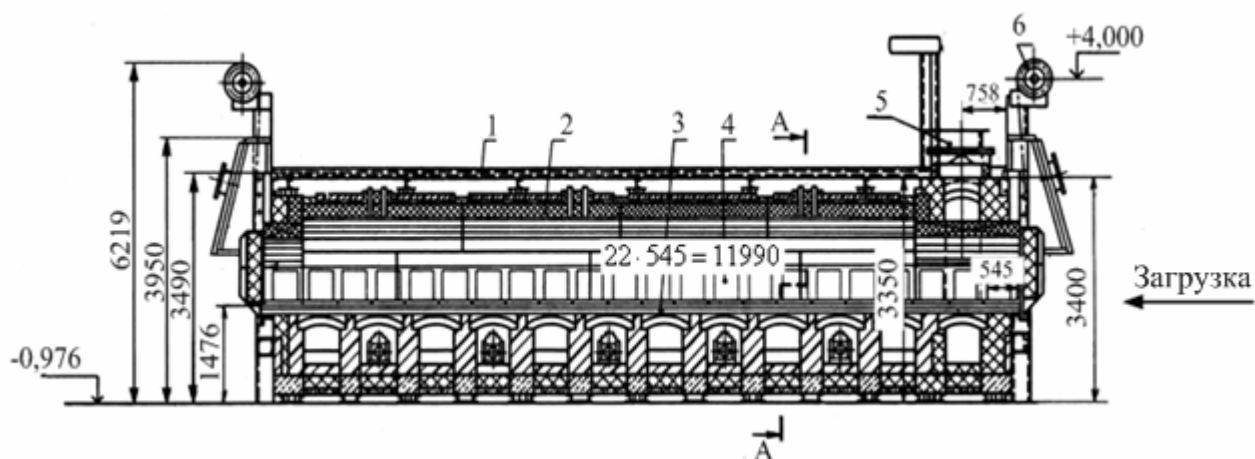
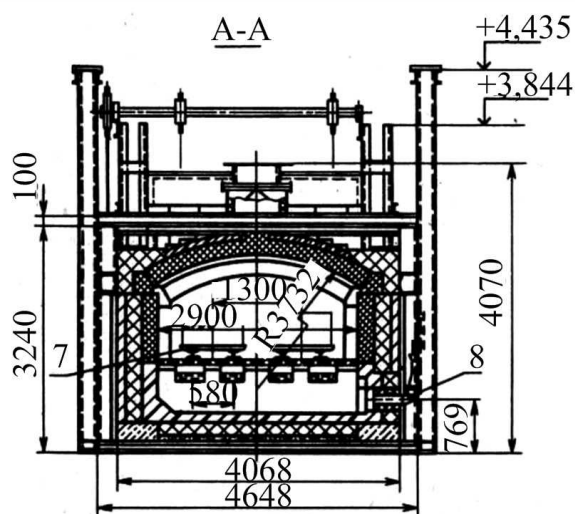


Рис. 1.3. Схема толкательной термической печи на газе



На рис. 1.3 обозначены:

- 1 – каркас печи;
- 2 – футеровка печи;
- 3 – подовые направляющие;
- 4 – заготовка;
- 5 – вытяжная система;
- 6 – механизм подъемной заслонки;
- 7 – поддон;
- 8 – разводка газа.

Таблица 1.1

### Параметры теплового агрегата

Общая длина печи, м	11,990
Длина моделируемой части печи $L$ , м	9,810
Длина одной зоны $L_1$ , м	0,982
Высота между сводом печи и нагреваемой поверхностью $H$ , м	0,555
Ширина печи $Sh$ , м	2,900
Диаметр устья дымохода $d$ , м	0,802
Максимальный объем дымовых газов $V_0$ , м <sup>3</sup> /с	0,7
Парциальное давление водяного пара $p_{H_2O}$ , кПа	17,2
Общее количество зон, на которое делится внутренняя поверхность и пространство печи, $l$	35
Парциальное давление углекислого газа $p_{CO_2}$ , кПа	8
Стехиометрическое число $\Omega$ , кг/кг	16,52
Коэффициент расхода воздуха, $K_{рв}$	1,05
Максимальный расход топлива, м <sup>3</sup> /ч	150
Низшая теплота сгорания топлива $Q_{н}^p$ , кДж/м <sup>3</sup>	35800
Плотность топлива, кг/м <sup>3</sup>	0,8
Коэффициенты поглощения зон кладки, $A_{12...24}$	0,599
Коэффициенты поглощения зон поверхности заготовок, $A_{1...11}$	0,7
Тепловое напряжение пода, кВт/м <sup>2</sup>	63
Температура нагрева наибольшая, °К	1273
Тепловыделение в цех, кВт	200
Число заготовок в печи, шт	44

## 1.2. Анализ способов и средств измерения температур активной зоны тепловых агрегатов

1.2.1. Термопреобразователи сопротивления (ТПС). Существует большое количество разнообразных физических явлений, возникающих при изменении температуры чувствительного элемента и исследуемого объекта, лежащих в основе измерения температуры. Вот некоторые из них: изменение объема, длины, электрического сопротивления, термо-ЭДС, энергетической яркости излучения. В соответствии с ГОСТ 13417-76 применяются следующие средства измерения температуры: термометры расширения, манометрические, термоэлектрические, термометры сопротивления, пирометры.

ТПС используют для измерения температуры в диапазоне от -270 до 1100°C в соответствии с ГОСТ 6651-94. Существуют различные виды ТПС: из благородных и неблагородных металлов, сплавов, полупроводниковые ТПС.

Платиновые термопреобразователи сопротивления (ТСП). К достоинствам ТСП стоит отнести их высокие: химическую инертность, температуру плавления, удельное сопротивление (10 мкОм/см при комнатной температуре).

В зависимости от назначения ТСП делят на прецизионные и технические. Их конструкции имеют существенные различия. Показателем чистоты платины и отсутствия в ней механических напряжений является ее температурный коэффициент сопротивления (ТКС) или отношения  $W_{100} = R_{100}/R_0$ , где  $R_{100}$  и  $R_0$  – сопротивление ТСП при 100 и 0 °С соответственно. Прецизионные ТСП должны иметь  $W_{100} > 1,3925$ . Чувствительный элемент прецизионных ТСП является спиралью из платинового провода с бифилярной намоткой, укрепленной на кварцевом каркасе или уложенной в кварцевые трубки.

Зависимость сопротивления ТСП от температуры в диапазоне от 1 до 630 °С хорошо аппроксимируется полиномом второй степени:

$$R_t = R_0(1 + A_t + B_t^2) \quad (1.1)$$

где  $R_t$  и  $R_0$  – сопротивление ТСП при температуре  $t$  и 0 °С соответственно;  $A$  и  $B$  – коэффициенты полинома. Серийные технические ТСП изготавливаются с номинальными значениями сопротивления  $R_0$ , равными 1, 10, 50, 100, 500 Ом, трех классов

точности: А, В и С. Отклонение, допускаемое от номинального значения  $R_0$ , составляет: для класса А  $\pm(0,05) \%$  при  $0\text{ }^\circ\text{C}$  или  $\pm(0,15+0,002|t|)\text{ }^\circ\text{C}$  в диапазоне  $(-220\dots850)\text{ }^\circ\text{C}$ ; для класса В  $\pm(0,1) \%$  при  $0\text{ }^\circ\text{C}$  или  $\pm(0,3+0,005|t|)\text{ }^\circ\text{C}$  в диапазоне  $(-220\dots1100)\text{ }^\circ\text{C}$ ; для класса С  $\pm(0,2) \%$  при  $0\text{ }^\circ\text{C}$  или  $\pm(0,6+0,008|t|)\text{ }^\circ\text{C}$  в диапазоне  $(-220\dots1100)\text{ }^\circ\text{C}$ .

ТПС на основе неблагородных металлов.

ТПС на основе меди (ТСМ). К достоинствам меди, как материала для изготовления ЧЭ ТПС, следует отнести близкую к линейной зависимость сопротивления от температуры, достаточно высокий ТКС, а также относительную дешевизну провода. Кроме того, ТСМ обладают хорошей взаимозаменяемостью. Недостатком меди является ее сильная окисляемость при повышенных температурах, что существенно сужает её температурный диапазон применения. Серийные технические ТСМ применяются для измерения температуры в диапазоне от  $-200$  к  $+200\text{ }^\circ\text{C}$ . Чувствительный элемент имеет обмотку из изолированного провода, укладывается в чехол, засыпается керамическим порошком и герметизируется. ТСМ изготавливаются с номинальными значениями  $R_0$ , равными 10, 50, 100 Ом. Отклонение, допускаемое от номинального значения  $R_0$ , составляет: для класса А  $\pm 0,05\%$ , В  $\pm 0,1\%$ , С  $\pm 0,2\%$ .

Никелевые ТПС. Преимущества: высокие значения ТКС и удельного сопротивления. Недостатки: сильная окисляемость при высоких температурах. Предельное значение температуры применения не превышает  $+150\text{ }^\circ\text{C}$ . Зависимость сопротивления ТПС Ni от температуры описывается полиномом (1.1).

Вольфрамовые ТПС. Преимущества: высокая механическая прочность, способствующая применению малоинерционных бескорпусных проволочных чувствительных элементов для измерения температур газовых потоков. Высокая температура плавления ( $2300\text{ }^\circ\text{C}$ ). Недостатки: сильная окисляемость, вследствие чего реальная температура применения не превышает  $600\text{ }^\circ\text{C}$ .

Индиевые и свинцовые ТПС. Преимущества: используются для измерения низких температур, вплоть до температур перехода в состояние сверхпроводимости (Pb переходит в состояние сверхпроводимости при  $7,2\text{ }^\circ\text{K}$ , а Id – при  $3,4\text{ }^\circ\text{K}$ ).

ТПС на основе сплавов. Преимущества: обладают более высокими показателями механической прочности и

сопротивляемости при повышенных температурах; более стойки к воздействию агрессивных сред; их удельное сопротивление в несколько раз больше, чем ТПС на основе металлов. Недостатки: изменяющийся от партии к партии состав сплавов, а следовательно – характеристики ЧЭ.

Полупроводниковые ТПС. Преимущества: чувствительность сопротивления к изменениям температур на порядок превосходит чувствительность ТПС из металла; высокое удельное сопротивление; малые габариты, высокая инерционность. Недостатки: ярко выраженная нелинейная зависимость сопротивления от температуры; ограниченный диапазон применения:  $(-100...+300)^{\circ}\text{C}$ ; значительный разброс характеристик датчиков. В качестве материала для изготовления ТПС ПП обычно используют смеси оксидов Cu, Ni, Co, Mn со связующим веществом.

1.2.2. Термоэлектрические преобразователи (термопары). Принцип действия термопар основан на использовании явлений Томсона и Зеебека. Явление Томсона заключается в установлении на концах однородного проводника, которому сообщен температурный градиент, разницы потенциалов, обусловленной диффузией электронов от более горячего конца к более холодному. Термо-э.д.с.

Томсона, определяется выражением:  $e_{\theta} = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sigma d\theta$ , где  $\sigma$  – коэффициент

Томсона для данного проводника. Если цепь состоит из двух разных проводников а и b, то суммарная термо-э.д.с. Томсона будет равна

[4]:  $e_{\theta ab} = \int_{\theta_1}^{\theta_2} (\sigma_a - \sigma_b) d\theta$ , где  $\sigma_a$  и  $\sigma_b$  – коэффициенты Томсона для

проводников а и b соответственно.

Сущность явления Зеебека заключается в следующем: при соединении двух различных проводников, в месте их контакта возникает разница потенциалов, обусловленная различной концентрацией носителей зарядов. Зеебеком было установлено, что в замкнутой цепи двух различных проводников, спаи которых находятся при температурах  $\theta_1$  и  $\theta_2$ , э.д.с.  $E_{ab}(\theta_1)$ , возникающая между проводником а и b в точке с температурой  $\theta_1$  и э.д.с.  $E_{ba}(\theta_2)$ , возникающая между b и а в точке с температурой  $\theta_2$ , имеют противоположные знаки и не равны между собой. Суммарная термо-э.д.с, в цепи из двух различных проводников а и b, является суммой

контактных                      э.д.с.                      и                      э.д.с.                      Томсона:

$$e_{ab}(\theta_1, \theta_2) = Eab(\theta_1) + Eab(\theta_2) + \int_{\theta_1}^{\theta_2} (\sigma_a - \sigma_b) d\theta.$$

«Горячим» называют спай термопары, помещаемый в исследуемую среду, «холодными» называют концы, температура которых поддерживается постоянной и подключается к измерительному преобразователю. При этом в месте присоединения прибора образуются другие спаи и цепь уже следует рассматривать как состоящую из трех проводников: а, b и с. Общая термо-э.д.с. такой цепи равна:

$$e = e_{ab}(\theta_1) + e_{bc}(\theta_2) + e_{ca}(\theta_3).$$

В зависимости от назначения, термоэлектрические преобразователи делят на погружаемые, предназначенные для измерения температур газообразных и жидких сред и поверхностные, предназначенные для измерения температур поверхности твердого тела. По показателям инерционности их разделяют на: малоинерционные, с показателем тепловой инерции не более 5 с для погружных и 10 с для поверхностных; средней инерционности – не более 60 с и 120 с и большой – с показателями тепловой инерции до 180 с и 300 с. Кроме стандартных термопар используются также и специальные. Это обусловлено стремлением расширить границы применения, повысить точность датчиков, спецификой условий эксплуатации, технико-экономическими соображениями. Так, для определения низких температур часто применяются медь-константановые термопреобразователи с рабочим диапазоном измеряемых температур (-200...+350)° С. Для измерения высоких температур (более 1300 °С) применяются термопреобразователи на основе тугоплавких металлов таких, как иридий, вольфрам, рений, родий, молибден, тантал, ниобий, а также на основе углеродных и графитовых волокон.



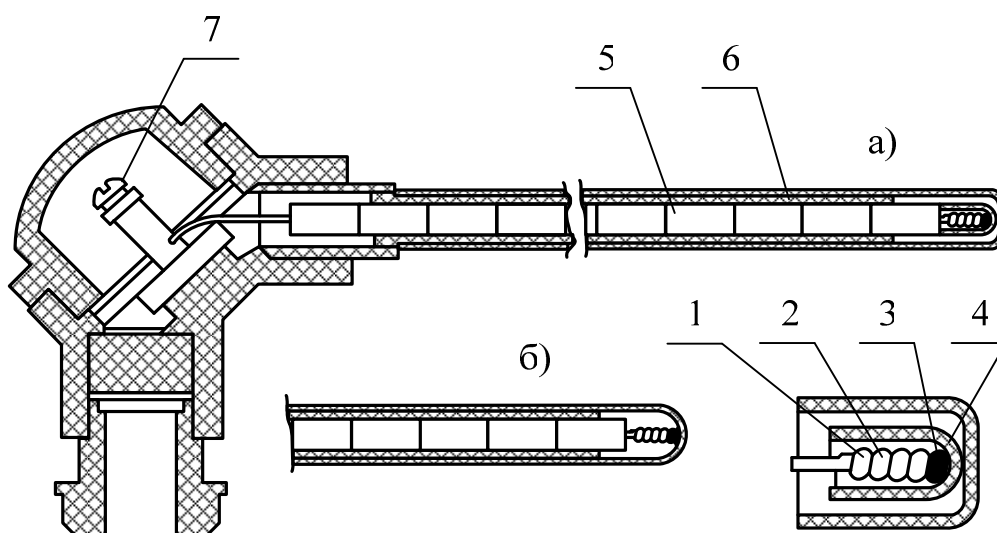


Рис. 1.4. Конструктивное оформление термопар

На рис. 1.4 обозначены: термоэлектроды – 1, 2; рабочий конец термопреобразователя – 3; электроизоляционный наконечник – 4; изолятор – 5; защитная арматура – 6; клеммы – 7.

В большинстве случаев, термоэлектроды 1 и 2 соединяют свариванием, причем их концы предварительно скручивают между собой. При низких значениях верхней границы температурного диапазона применения датчиков, соединение концов электродов можно выполнять спайкой. Тугоплавкие термоэлектроды, например на основе вольфрама, часто соединяют лишь скручиванием.

Термоэлектроды соединены лишь в рабочем конце. По всей остальной длине они электрически изолированы друг от друга. При этом можно использовать любой изолятор, если верхняя граница диапазона измерений не превышает (100...120) °С. При более высоких измеряемых температурах применяют изоляторы из фарфора, окислов алюминия, магния, бериллия, двуокисей тория, циркония, нитридов бора, муллитокремнеземов, ультрафарфора, оксидов циркония, оксидов иттрия, кордиерита. Свободные концы термоэлектродов подводятся к клеммам 7 контактной колодки. В зависимости от верхней температурной границы и агрессивности среды, защитная арматура может выполняться из сталей и сплавов, чугунов, оксидов алюминия, карбидов кремния.

В настоящее время получили широкое распространение термоэлектрические преобразователи на основе термопарного кабеля, а не отдельных проволок, который представляет собой гибкую металлическую трубку с размещёнными внутри нее термоэлектродами и минеральной изоляцией.

Следует отметить особенности, связанные с эксплуатацией платино-платинородиевых термопар градуировки ТПП. Вот перечень факторов, выделяемых сотрудниками фирм НПФ КонтрАВТ и Тесей, которые непосредственно влияют на работоспособность ТПП [7]:

- загрязнение электродов термопары металлами, восстановленными из газовой фазы при разложении окислов, из которых изготовлены изоляторы и чехлы;
- перенос родия, испаряющегося с платинородиевого термоэлектрода, к электроду из чистой платины;
- загрязнение электродов примесями, содержащимися в окружающей среде. Платина подвержена сильному коррозионному воздействию со стороны некоторых элементов, которые носят название «платиновые яды»: мышьяк, бор, фосфор, кремний, олово, цинк, сурьма и др;
- недостаточная устойчивость керамического защитного чехла к термоударам.

Различают три основных типа термопар: с открытым контактом; с изолированным не заземленным контактом; с заземленным контактом. Первый тип имеет низкую коррозионную стойкость и малую инерционность. Используется для измерения температур потоков. Два других – для измерения температур в агрессивных средах.

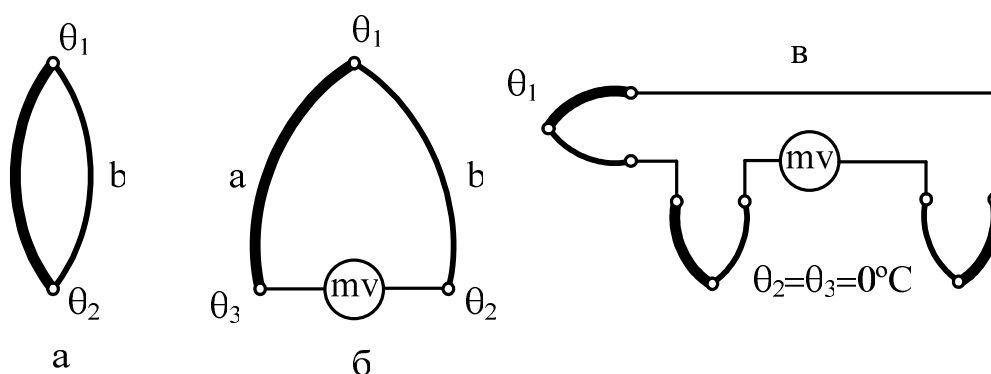


Рис. 1.5. Варианты подключения термопар

Для измерения температуры рабочего пространства большинства печей применяют термопары градуировки ТПП [8]. Подключение ТПП к преобразователям и вторичным приборам осуществляется компенсационными проводами. Способы измерения величины э.д.с. приведены в [9].

Несколько реже применяются термопары градуировки ТПР. Достоинство – можно измерять более высокие температуры (до 1800°C).

Установка ТП на своде и стенах для измерения температуры рабочего пространства печи имеет свою специфику. Наиболее простой способ показан на рис. 1.6. а

При установке ТП в боковых стенах стакан 3 приваривают к металлической обшивке печи. Кроме того, с внутренней стороны стены выполняют нишу размером 200x200x200 мм, а торец стакана 6 располагают заподлицо с кладкой. При измерении температур в верхних зонах нишу располагают на 500 мм выше, а в нижних зонах – на 300 мм ниже уровня заготовки.

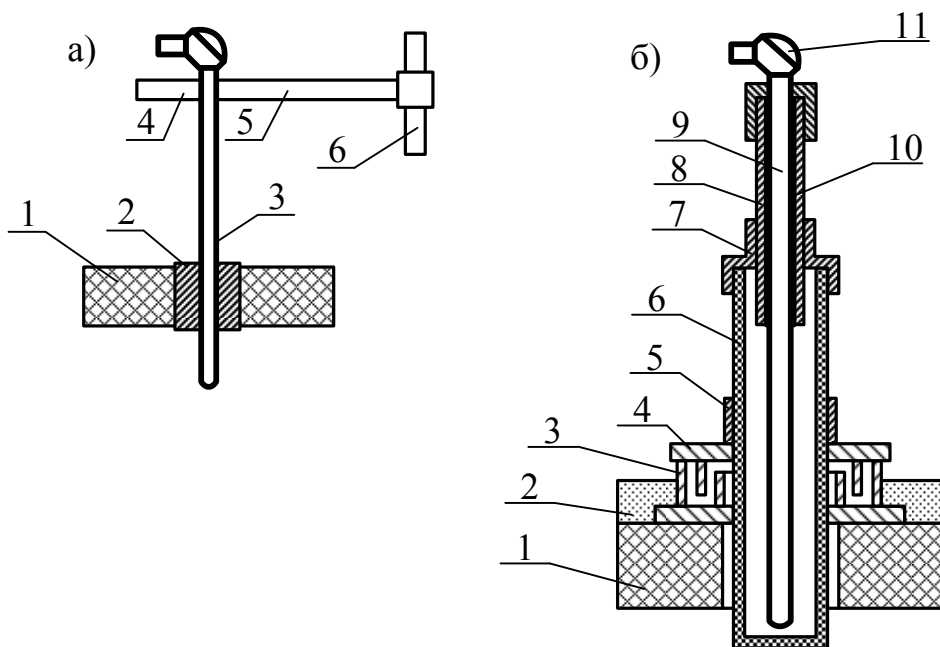


Рис. 1.6. Установка термопары на своде печи

На рис. 1.6. а изображены: 1 – термопарный кирпич; 2 – карборундовая защитная трубка; 3 – стандартная ТП; 4 – консоль; 5 – стойка.

На рис. 1.6. б изображены: 1 – термопарный кирпич; 2 – шамотный раствор; 3 – металлический сварной стакан; 4 – трубчатый фланец; 5 – зажим; 6 – карбофраксовый стакан; 7 – фланец; 8 – установочная трубка; 9 – фарфоровый чехол; 10 – шнуровой асбест.

Установленные в стенах ТП недостаточно точно характеризуют температуры рабочего пространства.

Для измерения температуры продуктов сгорания, а также нагреваемых в рекуператоре газа или воздуха применяются термопары градуировки ТХА [10].

При использовании для измерения температур теплового агрегата ТП, за величину искомого значения принимается средне-взвешенная по отношению к ТП температура всех тел рабочего пространства, включая заготовку, то есть значения температуры, измеренные ТП, характеризуют среднее значение температур факела, продуктов сгорания, свода, стен и заготовки. Это связано с тем, что суммарный тепловой поток, падающий на контактный датчик, состоит из теплового потока факела, продуктов сгорания, свода, стен и заготовки.

1.2.3. Пирометры. Применяют в печах для бесконтактного измерения температуры рабочего пространства печи и нагреваемых в ней тел. Пирометры могут применяться для измерения температур со значениями порядка 10000 °С.

Тепловое излучение характеризуется количеством энергии, излучаемым единицей поверхности тепла в единицу времени  $q$  (удельной мощностью излучения, энергетической светимостью), называемой также излучательной или лучеиспускательной способностью, Вт/м<sup>2</sup>; удельной мощностью излучения во внешнюю полусферу внутри спектрального интервала  $d\lambda$ , называемой также спектральной энергетической светимостью тела или плотностью излучения и обозначаемой для а.ч.т.  $E_{\lambda,T}^0$ , Вт/м<sup>2</sup>[11].

В соответствии с используемыми законами излучения различаются следующие методы бесконтактного измерения температуры: яркостные, спектрального отношения (цветовые), радиационные.

Яркостные пирометры основаны на измерении величины интенсивности монохроматического излучения, то есть яркости излучения в узком спектральном диапазоне. Интенсивность монохроматического излучения выводится из закона Планка, характеризующего распределение плотности излучения по спектру:

$$dE_{\lambda,T}^0 = c_1 \lambda^{-5} (e^{c_2/\lambda T} - 1)^{-1} d\lambda, \quad (1.2)$$

где  $c_1 = 2\pi h C^2 = 3,7413 \cdot 10^{-16}$  Вт/м<sup>2</sup>;  $c_2 = hC/k = 1,4380 \cdot 10^{-2}$  м·К;  $C = 2,9979 \cdot 10^8$  м/с – скорость света;  $h = 6,626 \cdot 10^{-27}$  эрг·с – постоянная Планка;  $K = 1,38065$  эрг/К – постоянная Больцмана;  $\lambda$  – средняя длина волны рассматриваемого спектрального интервала  $d\lambda$ , мкм;  $T$  – абсолютная температура, °К.

Для температур, меньших 4000 °К, в спектральном диапазоне от 0 до 5 мкм распределение Планка с точностью не хуже 0,1% можно заменить распределением Вина:

$$dE_{\lambda,T}^0 = c_1 \lambda^{-5} e^{-c_2/\lambda T} d\lambda. \quad (1.3)$$

Тогда интенсивность монохроматического излучения а.ч.т. получим дифференцируя выражения (1.2) и (1.3) по длине волны  $d\lambda$ :

$$\begin{aligned} I_{\lambda,T}^0 &= dE_{\lambda,T}^0 / d\lambda, \\ I_{\lambda,T}^0 &= c_1 \lambda^{-5} (e^{c_2/\lambda T} - 1)^{-1}, \\ I_{\lambda,T}^0 &= c_1 \lambda^{-5} e^{-c_2/\lambda T}. \end{aligned}$$

Для нечерного тела ее можно записать в виде

$$I_{\lambda,T} = \varepsilon_{\lambda,T} I_{\lambda,T}^0, \quad (1.4)$$

где  $\varepsilon_{\lambda,T}$  – степень черноты монохроматического излучения (спектральный коэффициент излучения) реального тела, зависящая от длины волны  $\lambda$ , абсолютной температуры  $T$ , материала излучателя и состояния его поверхности.

Пирометры спектрального отношения основаны на измерении величины отношения монохроматических интенсивностей излучения в двух длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ . Для реальных тел можно получить используя зависимость (1.4):

$$\frac{I_{\lambda_1,T}}{I_{\lambda_2,T}} = \frac{\varepsilon_{\lambda_1,T} I_{\lambda_1,T}^0}{\varepsilon_{\lambda_2,T} I_{\lambda_2,T}^0} = \frac{\varepsilon_{\lambda_1,T}}{\varepsilon_{\lambda_2,T}} \left( \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^5 e^{c_2/[T(\lambda_2 - \lambda_1)]},$$

а для случая  $E_{\lambda_1,T} = E_{\lambda_2,T}$

$$\frac{I_{\lambda_1, T}}{I_{\lambda_2, T}} = \left( \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^5 e^{c_2/[T(\lambda_2 - \lambda_1)]}.$$

Радиационные пирометры основаны на измерении величины общего количества энергии, излучаемой телом, то есть величины потока радиации. Величина суммарной (полной, интегральной) мощности излучения а.ч.т. во всем спектральном диапазоне от 0 до  $\infty$  определяется, в соответствии с законом Стефана-Больцмана, как  $E_T^0 = \sigma T^4$ , где  $\sigma = 2\pi^5 K^4 / 15h^3 C^2 = 5,6687 \cdot 10^{-8}$  Вт/(см<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – константа излучения а.ч.т.

Для нечерного (реального) тела:

$$E_T = \varepsilon_T E_T^0 = \varepsilon_T \sigma T^4,$$

где  $\varepsilon_T$  – степень черноты интегрального излучения (интегральный коэффициент излучения), зависящая от абсолютной температуры, материала излучателя и состояния его поверхности.

При выборе места установки пирометра необходимо обеспечить минимальное расстояние до заготовки и отсутствие факела в поле визирования. Распределение температур по поверхности кладки должно быть как можно более равномерным, а изменения ее температуры в процессе нормальной эксплуатации печи минимальными.

Эти коэффициенты определяются состоянием печи и режимом ее работы и могут быть найдены в результате одновременного выполнения большого количества измерений температур заготовки, газа и стен.

Поскольку коэффициенты зависят от режима работы печи, то величины их будут непрерывно меняться, что вызовет переменную погрешность при вычислении температуры заготовки. Определить зависимость каждого коэффициента от режима сложно, кроме того, по мере изменения состояния печи найденные зависимости будут меняться.

Но даже при достаточной стабильности коэффициентов необходимо осуществить непрерывное измерение температур стен и газа, что требует дополнительных средств контроля и проведения исследований с целью выбора мест установки соответствующих датчиков с учетом распределенности параметров методической печи.

Определение температуры рабочего пространства теплового агрегата. Основным направленно изменяемым параметром при нагревании заготовки является температура рабочего пространства теплового агрегата. Именно она определяет распределение температур по сечению нагреваемого тела, теплоотдачу заготовке, износ конструкций печи и другие важнейшие параметры процессов, протекающих при тепловой обработке и работе агрегата. Эта температура является главным источником информации о тепловом состоянии отдельных зон и всей печи в целом.

Трудности, возникающие при измерениях температур рабочего пространства печи вызваны наличием сложного радиационно-конвективного теплообмена, а именно – присутствием непрозрачной излучающе-поглощающей газовой среды, процессов горения топлива, множественных переотражений излучения в печном пространстве [12].

Проходная печь является объектом с распределенными параметрами. Каждая точка печного пространства имеет свою температуру, которая определяет тепловой поток из этой точки на поверхность нагреваемого тела. Подвод тепла к этой поверхности осуществляется вследствие излучения факела, продуктов горения, стен и свода, а также конвекции [13].

Тогда, в соответствии с законом Стефана-Больцмана, количество тепла, подводимого к нагреваемому телу в единицу времени, выражается формулой:

$$Q = c_n \left[ \left( \frac{t_n + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_3 + 273}{100} \right)^4 \right] F_m, \quad (1.5)$$

где  $F_m$  – лучевоспринимающая поверхность заготовки,  $\text{м}^2$ ;  $t_n$  – температура печи,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_3$  – температура заготовки,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $c_n$  – приведенный коэффициент излучения, отнесенный к температуре печи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{K}^4)$ .

Как указано выше, заготовка облучается различными элементами печного пространства. Они имеют разные значения температур и по разному расположены друг относительно друга и заготовки. Обычно всю совокупность излучателей печи (зоны) заменяют некоторым одним, общим излучателем, который при своей собственной температуре обеспечит суммарное значение результирующего потока. Тогда температура этого излучателя может быть использована в качестве  $t_n$ .

В работе [14] рекомендуется в качестве температуры печи принять значения измеренные ТП, расположенной непосредственно у поверхности нагреваемого тела, но при этом защищенной от него экраном и «видящей» через факел и продукты горения только стены и свод печи. Измеренные ТП значения будут характеризовать среднее тепловое состояние зоны, приведенное к точке замера, и не будут зависеть от температуры нагреваемого тела. Однако значения ее сигнала будут существенно зависеть от координаты места установки.

В работах [15] и [16] за температуру печного пространства принимается средневзвешенная по отношению к ТП температура всех тел рабочего пространства, включая заготовку, то есть измеренные ТП значения характеризуют среднее значение температур факела, продуктов сгорания, свода, стен и заготовки.

В соответствии с таким подходом к выбору  $t_n$  приведенный коэффициент излучения  $c_n$  в (1.5) определится, согласно данным работ [16] и [17] следующим образом:

$$c_n = \frac{\sigma_0 \varepsilon_m (1 - \varphi_{m,m})}{1 - \varphi_{m,m} (1 - \varepsilon_m)},$$

где  $\varphi_{m,m}$  – угловой коэффициент,  $\varphi_{m,m} = F_m / (F_k + F_m)$ ;  $F_m$  – площадь лучеиспускающей поверхности нагреваемого тела, м<sup>2</sup>;  $F_k$  – площадь лучеиспускающей поверхности кладки, м<sup>2</sup>;  $\varepsilon$  – степень черноты;  $\sigma_0$  – константа излучения а.ч.т. (5,6685 Вт/(м<sup>2</sup>·°К<sup>4</sup>)).

В работе [18] и [16] к важнейшим элементам, определяющим результирующее излучение, отнесены: общая температура факела и продуктов горения  $t_g$ , кладки  $t_{кл}$ , поверхности нагреваемого тела  $t_{нт}$ , а также геометрия зоны, определяющая  $\varphi_{m,m}$ , гидродинамические условия ( $\Gamma$ ) и радиационные свойства тел, участвующих в теплообмене ( $\varepsilon_{газа}$ ,  $\varepsilon_{кладки}$ ,  $\varepsilon_{металла}$ ). Тогда температура печи определяется как  $t_n = f(t_g, t_{кл}, t_{нт}, \varphi_{m,m}, \Gamma, \varepsilon_{газа}, \varepsilon_{кладки}, \varepsilon_{металла})$ .

При использовании для измерения температуры рабочего пространства пирометров, их телескоп визируют на дно карбофраксового стакана, введенного в печь через свод или боковые стенки. Установка стакана может быть выполнена аналогично показанной на рис. 1.6.б. Существенных преимуществ в точности и динамике замена ТП на пирометры не дает.

Определение температуры нагреваемого тела. Температура заготовки является важнейшим параметром, характеризующим процесс нагрева. Существенной является не только температура ее поверхности,



но и распределение по толщине. Непрерывный замер этого распределения для всех нагреваемых заготовок невозможен, поэтому используют в качестве измеряемого параметра только температуру поверхности. Температуру внутри заготовки определяют расчетом с использованием уравнений внутренней теплопередачи. В работах [19] и [20] рассматриваются способы контроля распределения температур по поверхности нагреваемого тела, а также управление нагревом заготовки.

При проверке точности моделей нагрева и их адаптации, под температурой нагреваемого тела понимается температура поверхности заготовки, измеренная в любом заранее заданном и удобном для обслуживания месте. Допустимая абсолютная погрешность измерения температуры поверхности заготовки по данным работ [21] и [16] составляет  $\pm 10$  °К.

По данным технического задания для толстолистового стана 2800 ОАО «Ашинский металлургический завод» точность измерения температур внутреннего пространства проходных печей и поверхностей нагреваемых тел должны быть не хуже  $+10$  °С [22].

Непрерывное определение распределения температур по толщине заготовки может быть выполнено только расчетным путем. При измерении температуры нагреваемого тела телескоп пирометров визируют на поверхность нагреваемого тела через отверстие в своде или боковых стенках печи [23].

Если по условиям технологии требуется измерять температуру нагреваемого тела вблизи горелок, то применяют специальную погружаемую в печное пространство водоохлаждаемую вентилируемую фурму, конструкция которой показана на рис. 1.7. Расстояние между торцом фурмы и поверхностью заготовки составляет 100...200 мм. Для уменьшения искажения температурного поля нагреваемого тела и расхода охлаждающей воды фурму снаружи покрывают теплоизоляцией. Вопросы применения пирометров в методических печах для измерения температур поверхности нагреваемых заготовок рассмотрены в работе [24].

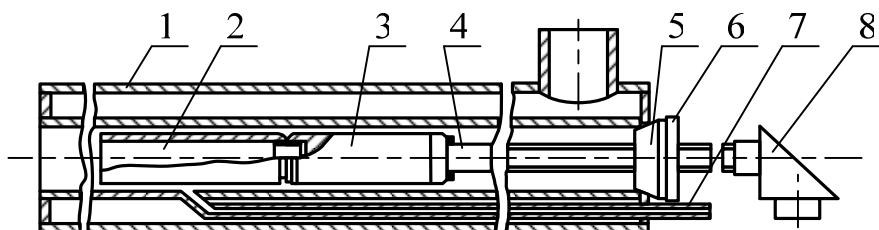


Рис. 1.7. Водоохлаждаемая фурма с установленным радиационным пирометром

На рис. 1.7 изображены: 1 – фурма; 2 – визирный тубус пирометра; 3 – радиационный пирометр; 4 – удлинитель; 5 – резиновая пробка; 6 – установочный фланец; 7 – воздушная трубка фурмы; 8 – клеммная чаша.

На результаты измерения температуры заготовки оказывает влияние присутствие промежуточной среды. Она поглощает часть излучения контролируемой поверхности, а также испускает собственное излучение, которое попадает в объектив пирометра. При нагреве значения температур промежуточной среды выше значений температур поверхности нагреваемого тела, поэтому поглощение газовой средой части излучения поверхности заготовки приводит к занижению показаний температур, а ее собственное излучение – к завышению [25]. Вносимая погрешность измерения пропорциональна коэффициенту излучения среды, определяемому ее составом и плотностью и разности температур среды и контролируемой поверхности. Поглощательная способность газовой среды теплового агрегата зависит от наличия в ней сажистых частиц, давления и количества водяного пара и  $\text{CO}_2$ .

В соответствии с законом Ламберта-Бугера коэффициент излучения (поглощения) слоя конечной толщины равен:

$$\varepsilon_c = 1 - \exp(-A_1 d_0), \quad (1.6)$$

где  $A_1$  – удельный коэффициент поглощения,  $\text{м}^{-1}$ ;  $d_0$  – толщина поглощающего слоя, м.

Суммарная мощность  $\Delta E_c$  дополнительного излучения среды, вызывающего погрешность измерения, равна ( $\text{Вт/м}^3$ ):

$$\Delta E_c = \sigma_0 \varepsilon_c (T_c - T_s),$$

где  $T_c$  и  $T_s$  – температуры среды и поверхности заготовки соответственно,  $^\circ\text{К}$ ;  $\varepsilon_c$  – степень черноты газовой среды.

Свести к минимуму  $\Delta E_c$  можно, используя пирометры, работающие в спектральном диапазоне, отличном от диапазона

излучения  $\text{CO}_2$  и паров воды, или применяя соответствующие светофильтры с последующей переградуировкой пирометра.

Другим наиболее распространенным способом уменьшения  $\Delta E_c$  является применение визирных труб, продуваемых воздухом или азотом. Труба вводится в печное пространство, чем достигается уменьшение  $d_0$  в (1.6). Интенсивная продувка лучепрозрачным газом, например азотом, снижает  $A_1$ , практически до нуля [26], [16].

Результаты применения указанного способа приведены в работе [27]. На методической печи, отапливаемой доменным газом, установили радиационный пирометр в водоохлаждаемой фурме, продуваемой воздухом. При этом была обеспечена точность измерения температуры поверхности слябов в томильной зоне  $+10$  °К, в сварочной  $+15$  °К и в методической  $+(40. . . 80)$  °К. Дальнейшее приближение фурмы к металлу может уменьшить указанные погрешности, но приведет к искажению температурного поля поверхности сляба и вызовет дополнительные трудности в обслуживании. В работе [16] говорится о необходимости точного измерения температур в методической зоне для более эффективного поддержания требуемого температурного профиля печи.

Изменение радиационных свойств поверхности заготовки в процессе ее нагрева ведет к изменению коэффициента излучения  $\varepsilon_n$  (степени черноты излучения), что вызывает дополнительную погрешность, которая, по данным работы [16], может составить  $60$  °К и более.

Таким образом можно сделать вывод о том, что требуемые показатели точности измерения температур поверхностей нагреваемых тел при помощи пирометров обеспечиваются лишь в томильной зоне.

Отраженное поверхностью нагреваемого тела излучение более горячих окружающих поверхностей печи и факела вызывает наиболее существенную погрешность измерения, величина которой зависит от коэффициента отражения поверхности и перепада между ее температурой и температурой рабочего пространства печи. Полное экранирование контролируемой поверхности от излучения рабочего пространства, например с помощью водоохлаждаемого фланца или очень близкого приближения фурмы, неизбежно приведет к искажению температурного поля, что вызовет дополнительную погрешность, учет которой практически невозможен.

Без применения экранирования результирующий сигнал радиационного пирометра выражен в работе [16] следующим образом:

$$T_{пир}^4 = A \cdot T_{загот}^4 + B \cdot T_{газа}^4 + C \cdot T_{стен}^4 ,$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $C$  – коэффициенты, зависящие от температуры газа его состава, от коэффициентов излучения поверхности нагреваемого тела и стен печи.

1.2.4. Тепловизоры. Тепловидение – получение видимого изображения объекта по его собственному, или отраженному от него тепловому излучению. Служит для определения места расположения и формы объектов, находящихся в темноте или оптически непрозрачных средах, изучения их степени нагрева и распределения температурного поля по их поверхности.

Тепловизионные системы (ТВС) можно определить как совокупность оптико-электронной аппаратуры, которая обеспечивает возможность наблюдения и измерения температур нагретых объектов в инфракрасной (ИК) области спектра. Существуют промышленные тепловизоры, имеющие два режима работы: низкотемпературный, до 550 °С (ИК область спектра) и высокотемпературный (550-3000 °С).

Формируемое системой видимое изображение называется термограммой и представляет собой ИК изображение объекта.

Современные тепловизоры строятся на основе фотодиодных ПЗС («прибор с зарядовой связью») матриц, позволяющих хранить принятый световой сигнал. Этот сигнал расшифровывается дешифратором, обрабатывается в процессоре устройства, а затем проецируется на экран прибора в виде распределения температур, обозначенных цветами видимой части спектра.

Наиболее перспективным направлением развития современных тепловизоров является применение технологии неохлаждаемых болометров, основанной на сверхточном определении изменения сопротивления тонких пластинок, под действием теплового излучения всего спектрального диапазона [28].

К областям применения ТВС в промышленности и науке при исследовании температурных полей относят следующие:

- измерение температур в технологических процессах (изготовление металлопроката, изделий из стекла, бумаги, резины, железобетона и так далее);
- измерение температуры оборотных деталей машин, а также металлических деталей и инструментов станков;
- определение положений подземных и скрытых коммуникаций, повреждений технических устройств;
- контроль теплотерь зданий;
- военная промышленность (обнаружение замаскированных объектов и живой силы);
- контроль уровня и положения теплых или холодных жидкостей в резервуаре;
- исследование тепловых эффектов в медицине;
- контроль теплового режима электротехнических устройств (силовых трансформаторов, электродвигателей, магнитных пускателей, высоковольтных линий электропередач).

В класс несканирующих устройств входят эджеографы, эвапорографы и разнообразные термофотоаппараты. В основе работы эвапорографа лежит различная скорость испарения масляной пленки, на которую спроектировано тепловое изображение. Благодаря интерференционным явлениям, тепловое изображение, преобразуемое в изменение толщины масляного слоя, можно увидеть в отраженном свете.

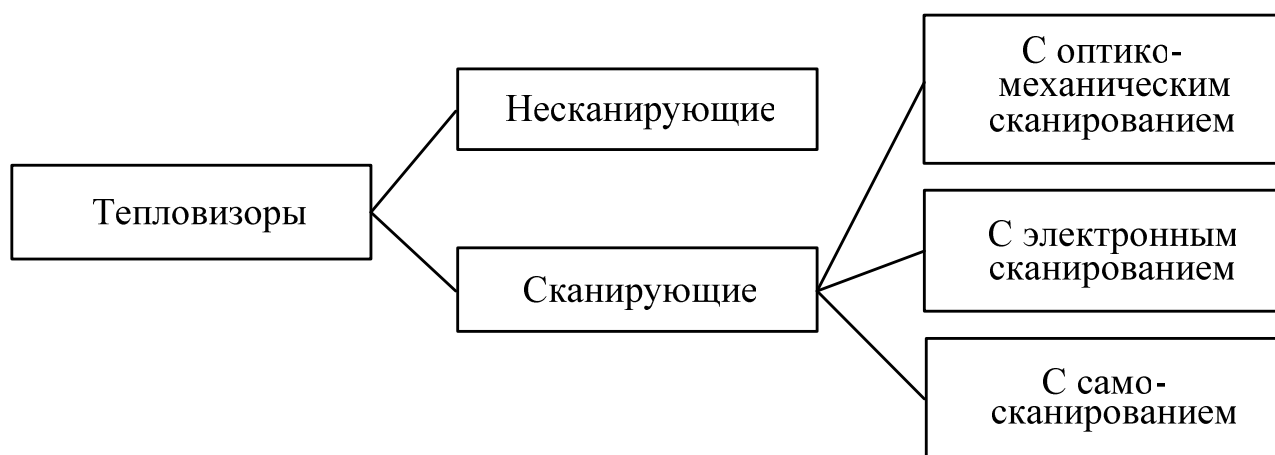


Рис. 1.8. Классификационная схема тепловизоров

Принцип действия эджеографа основан на зависимости от температуры границы полосы поглощения некоторых материалов.

Широкого практического применения данные устройства не получили в связи со сложностью технического исполнения, недостаточной чувствительностью, быстродействием и трудностями возникающими при анализе полученных результатов.

Класс сканирующих ТВС широко использует метод развертывающего преобразования, предложенный Ф. Е. Темниковым. Этот класс систем можно разделить на три больших подкласса ТВС: оптико-механические, комбинированные, оптико-электронные.

Оптико-механические тепловизоры имеют один канал и один точечный приемник излучения. Это требует поэлементного анализа поля.

Оптико-электронные системы являются наиболее распространенными и универсальными на сегодняшний день. Они используют полупроводниковые матрицы в качестве приемников излучения.



Рис. 1.9. Пример термограмм и тепловизоров

### 1.3. Анализ источников погрешностей измерения температур в проходных печах

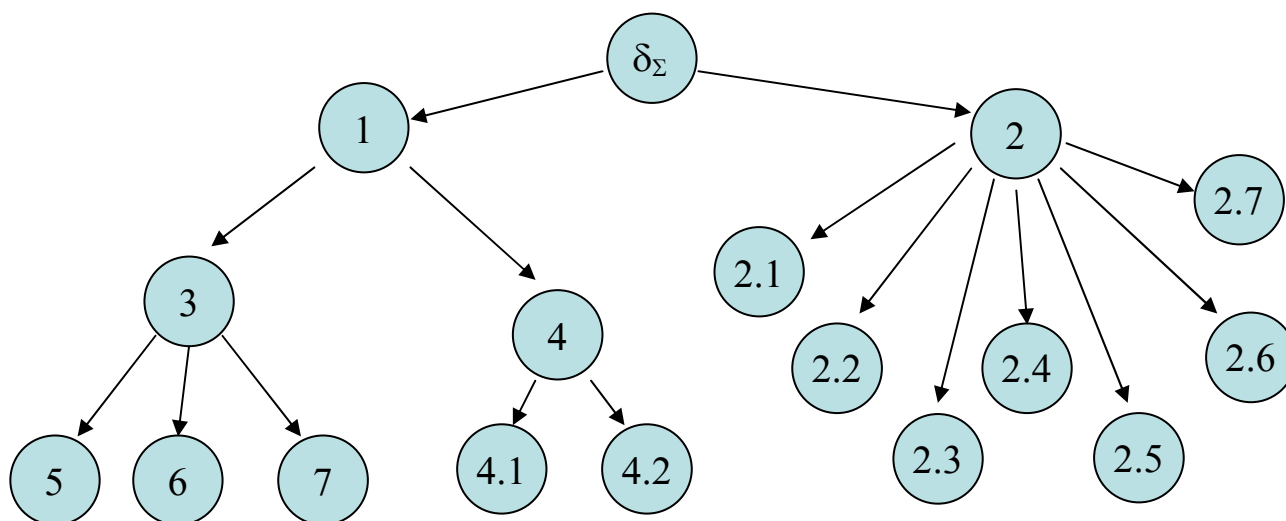


Рис. 1.10. Граф составляющих погрешности измерений методом непосредственной оценки

На рис. 1.10 обозначены:

- 1 – инструментальная погрешность;
- 2 – погрешность метода измерений;
- 2.1 – излучение факела;
- 2.2 – переотражение излучения кладкой и нагреваемыми телами;
- 2.3 – испускание излучения кладкой и нагреваемыми телами;
- 2.4 – поглощение излучения продуктами сгорания;
- 2.5 – испускание излучения продуктами сгорания;
- 2.6 – координата места установки датчика;
- 2.7 – погрешность модели;
- 3 – погрешность измерительного преобразователя (ИП) в рабочих условиях;
- 4 – погрешность взаимодействия ИП с объектом;
- 4.1 – погрешность искажения температурного профиля теплового агрегата, обусловленная введением активной части датчика в рабочее пространство;
- 4.2 – погрешность искажения температурного профиля теплового агрегата, обусловленная способом установки датчика;
- 5 – основная погрешность ИП;
- 6 – дополнительная погрешность ИП;
- 7 – динамическая погрешность ИП.

Как упоминалось ранее, теплообмен во внутреннем пространстве проходных печей является радиационно-конвективным. При этом имеют место множественные переотражения, испускания и поглощения излучений кладки, газа и нагреваемых тел. На рис. 1.11 изображены возмущающие факторы, оказывающие влияние на результат измерений температур активной зоны печи.

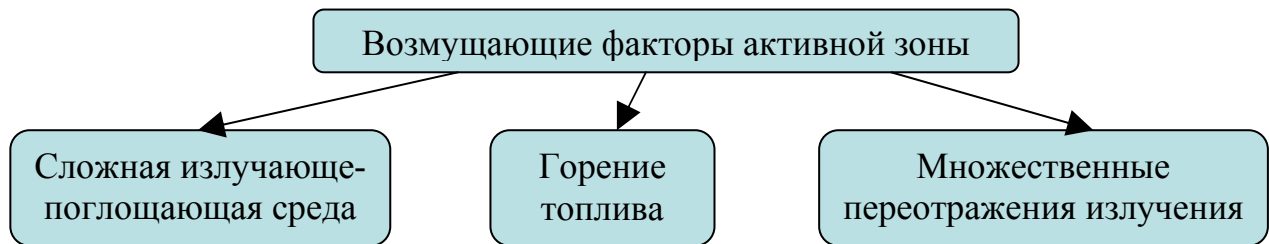


Рис. 1.11. Возмущающие факторы

На рис. 1.12. изображены составляющие конечного результата измерения температур в пространстве проходных печей.

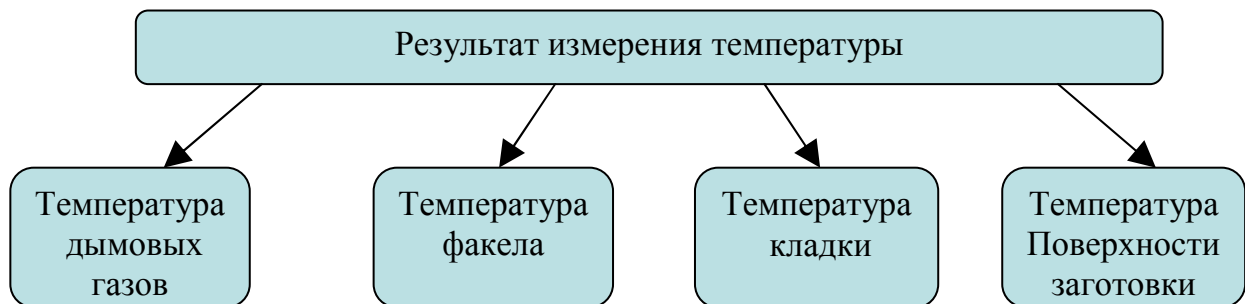


Рис. 1.12. Составляющие результата измерения температуры

Учет описанных возмущающих факторов, влияющих на результаты измерений температур, возможен с применением ИИС, содержащих в своем составе виртуальные модели и сертифицированные устройства.



## 1.4. Анализ существующих решений в области ИИС контроля температур тепловых агрегатов

1.4.1. SCADA-системы. SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) – программный пакет, предназначенный для создания систем, функционирующих в режиме реального времени и выполняющих сбор, обработку, отображение и архивирование информации об объекте. SCADA-системы применяются для обеспечения контроля за технологическими процессами в режиме реального времени с присутствием оператора. SCADA может быть самостоятельной системой или частью [АСУ ТП](#), системы учета электроэнергии, экологического мониторинга и так далее.

Программное обеспечение обычно устанавливается на промышленные компьютеры с ОС реального времени. Между тем следует отметить тот факт, что в последнее время, в связи с увеличением влияния корпорации Microsoft на рынке ОС, разработчики SCADA-систем предпринимают попытки к развитию своих систем на платформе Windows NT, хотя её и нельзя строго классифицировать как ОС реального времени. Некоторые фирмы, до сих пор проектировавшие SCADA-системы для работы на базе ОС реального времени, начали менять ориентацию, выбирая в качестве платформы Windows NT. При этом у разработчиков появилась возможность использовать расширение реального времени (RTX), чтобы преодолеть недостатки Windows NT в задачах реального времени.

Программный код может быть написан как непосредственно в среде проектирования, так и на отдельном языке программирования. Если SCADA-системы содержат ПО для программирования промышленных контроллеров, их называют «интегрированными».

SCADA-система обычно содержит следующие подсистемы:

1. [Система реального времени](#) – обеспечивает обработку данных в пределах заданного промежутка времени с учетом приоритетов.
2. Система логического управления – обеспечивает исполнение пользовательских программ в SCADA-системе.
3. Драйверы или серверы ввода-вывода – обеспечивают связь SCADA с [промышленными контроллерами](#), [АЦП](#), модулями удаленного сбора данных и так далее.

4. Человеко-машинный интерфейс – представляет оператору данные о ходе процесса в удобной и интуитивно понятной форме.
5. База данных реального времени – обеспечивает сохранение истории процесса в реальном времени.
6. Генератор отчетов – обеспечивает создание пользовательских отчетов о технологических событиях.
7. Внешние интерфейсы – стандартные интерфейсы обмена данными между SCADA и другими приложениями.
8. Система управления тревогами – обеспечивает контроль и идентификацию технологических событий, с последующим отнесением их к категории нормальных, предупреждающих или аварийных.

Основные возможности и средства, присущие всем системам:

- автоматизированная среда разработки, позволяет создавать ПО системы автоматизации без наличия особых навыков программирования (текст программ понятен на интуитивном уровне и близок к восприятию автоматизируемого процесса, а развитый инструментарий объектно-ориентированного программирования делает процесс написания программ легким в освоении и доступным широкому кругу пользователей);
- сбор и обработка первичной информации, получаемой от устройств нижнего уровня;
- хранение информации с возможностью последующей обработки;
- мониторинг и управление сигналами об аварийных ситуациях;
- средства визуализации информации для оператора в виде графиков, гистограмм, трендов и т.п.

Часто перед программистами встает задача создания и включения в систему автоматизации собственных, не предусмотренных средой SCADA-системы, программных модулей. Для этого система должна быть открытой, то есть позволять подключать внешние, независимо разработанные компоненты. В сущности, под открытостью системы подразумевается доступность спецификаций системных вызовов, реализующих тот или иной системный сервис. Все SCADA-системы можно считать открытыми. Они имеют открытый протокол разработки дополнительных собственных функций, доступность к стандартным базам данных, развитую сетевую поддержку.

Что касается вопроса наличия необходимых драйверов для устройств нижнего уровня, то тут современные SCADA-системы предоставляют большой набор драйверов или серверов ввода-вывода, плюс ко всему имеют хорошо развитые средства создания собственных программ для устройств нижнего уровня. Драйверы обычно разрабатываются с использованием стандартных языков программирования.

Таким образом, SCADA-системы предназначены для мониторинга и управления технологическими процессами. Они лишены мощных средств математических вычислений и обработки получаемых сигналов, в отличие от автоматизированных систем научных исследований, таких как, например, пакет LabVIEW фирмы National Instruments.

#### 1.4.2. Обзор примеров ИИС контроля температур.

НПФ «РЕГМИК». АССОД (Автоматизированная Среда Сбора и Обработки Данных) [29].

Программное обеспечение «Система сбора данных» позволяет:

- производить считывание, просмотр и документирование информации с приборов и датчиков с интерфейсом RS-485 или USB;
- отображать информацию в табличном или графическом виде;
- производить оперативное изменение конфигурационных параметров приборов и датчиков.

Возможности ПО ССД:

- хранение информации в базе данных FireBird;
- полная настройка отображения графиков, мониторов (цвет, шрифт, вид и так далее.);
- неограниченное количество подсетей (доменов), приборов, каналов;
- возможность добавления в сеть приборов и датчиков сторонних производителей;
- наличие встроенного генератора отчетов позволяет сформировать всевозможные варианты выходных отчетов. Стандартный набор отчетов поставляется вместе с ПО ССД;
- встроенная система отслеживания аварийных ситуаций работы приборов, наличие звуковой сигнализации;
- возможность считывания информации с приборов-логгеров;
- работа с данными по FTP, GSM;

- конфигурирование приборов и датчиков по протоколу ModBus RTU с помощью интерфейсов RS-485, USB;
- удаленное конфигурирование приборов и датчиков с использованием беспроводных сетей WI-FI, GSM;
- импорт и экспорт данных (PDF, Excel, Word и другие);
- резервирование данных, создание точек восстановления данных;
- возможность доступа к данным из нескольких рабочих мест;
- хранение в БД служебной информации - место установки датчиков и приборов, пользовательское название приборов и датчиков, единицы измерения и пр.

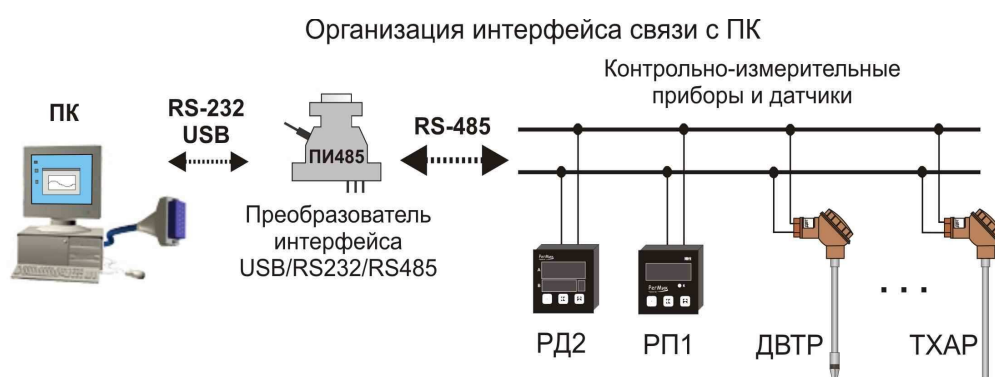


Рис. 1.13. Схема АССОД

Подключение приборов к компьютеру осуществляется через преобразователь интерфейса USB/RS-232/RS-485. Максимальное количество приборов в сети - 255. Максимальное расстояние между ПК и приборами составляет 1000 м. Передача информации между приборами и компьютером может осуществляться с помощью GSM-связи.

ВИТЦ (Воткинский инженерно-технический центр). Автоматизированная информационная система (АИС) контроля технологических параметров процесса обжига кирпича [30].

Автоматизированная информационная система обеспечивает сбор, представление и обработку данных отображающих ход технологического процесса обжига кирпича.

Система построена на доступных аппаратных средствах отечественных и зарубежных производителей. Она предусматривает возможность дальнейшего усовершенствования без существенного

изменения структуры и комплектующих элементов путем наращивания и использования в составе АСУ ТП.

В процессе работы система обеспечивает выполнение следующих функций:

1. Периодическое измерение значений температуры и давлений в отдельных зонах печи.
2. Периодическое измерение значений параметров атмосферной среды: температуры и влажности воздуха, абсолютного атмосферного давления.
3. Периодическое измерение давления в воздуховодах системы отбора и нагнетания печных газов и воздуха.
4. Передачу измеренных данных в компьютер, установленный в помещении службы технолога.
5. Отражение текущих значений технологических параметров на мнемонической схеме на экране монитора.
6. Запись полученных данных в отдельный файл.
7. Обработку данных и представление их в графическом виде для оперативного контроля и анализа процесса обжига кирпича.
8. Архивирование данных за предыдущие периоды, с возможностью их просмотра, анализа и распечатки.

Для реализации указанных функций система содержит следующие основные компоненты:

1. Датчики температуры – 15 датчиков установлены в выборочных зонах туннельной печи. Выполнены в виде закрытых термопар (ТХА), заведенных через боковые стены печи в зоны обжига.
2. Датчики давления установлены в выборочных зонах туннельной печи обжига и в воздуховодах вентиляторов подачи или отбора воздуха Датчик открывания двери – установлен на двери закатки в печь.
3. Датчик атмосферных параметров, включающий в себя 3 датчика: датчик температуры, датчик влажности, датчик атмосферного давления. Датчик атмосферы установлен в специальном защитном кожухе на открытом воздухе вдали от производственного здания.
4. Блок измерительных приборов, содержащий 4 измерителя ТРМ138, адаптер сети АС-3. Блок установлен в помещении обжигальщика рядом с компьютером.
5. Компьютер установлен совместно с блоком измерительных приборов в помещении обжигальщика.

6. Кабели связи блока измерительных приборов с датчиками.
7. Программа опроса датчиков.
8. Программа сбора и обработки данных.

Фирма «Символьт». Система контроля туннельной печи для обжига кирпича [31].

Предназначена для контроля и поддержания температуры в заданных пределах на различных участках печи для обжига кирпича. Построена на основе двухканального регулятора DO 9404 и регулируемого трансмиттера сигнала термопары типа HD 778 (978) фирмы Delta OHM.

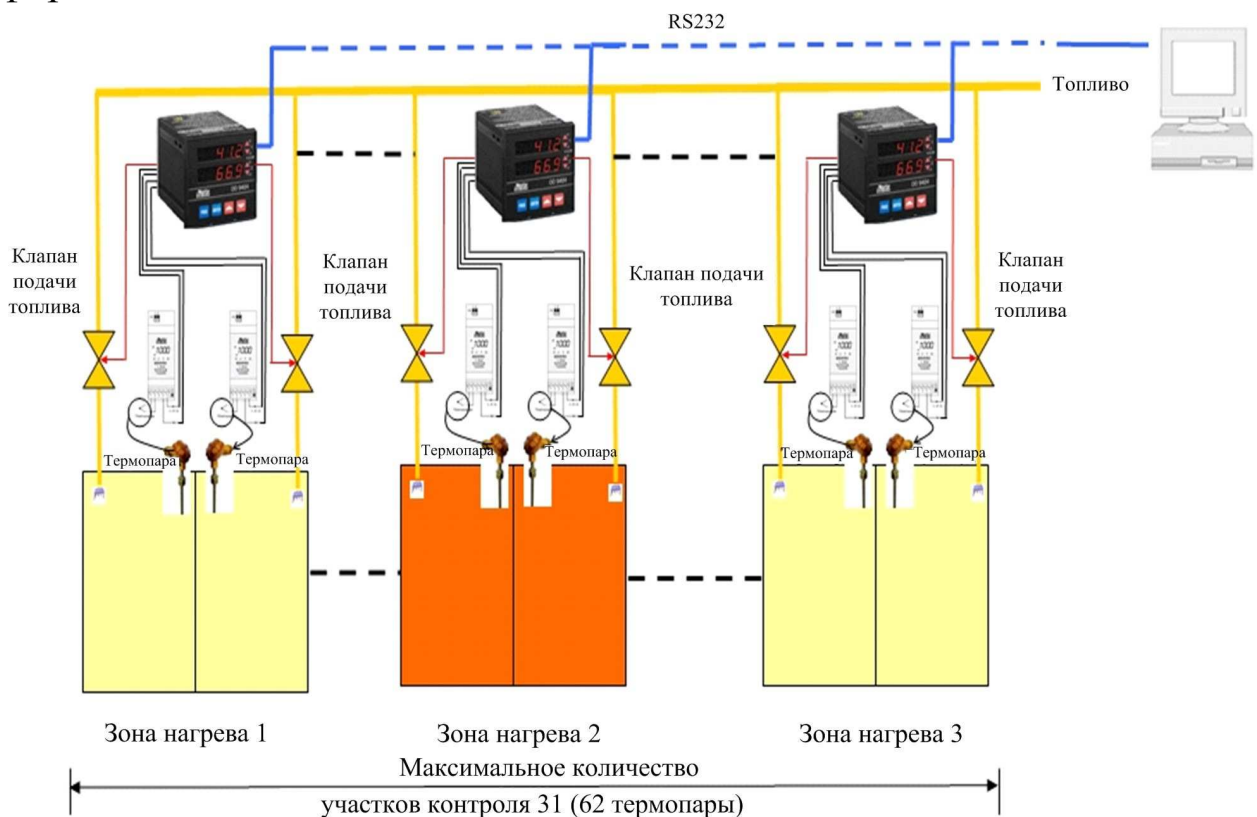


Рис. 1.14. Схема системы контроля туннельной печи

Имеет следующие параметры:

- границы измерения температуры 0 ... 1200 °С;
- тип термопар используемых К, J, Т, N;
- количество регуляторов в системе (максимальное) – 31.

Фирма «СР ЛТД». Автоматизированная система управления технологическим процессом закалки и отпуска труб в секционных



печах №1,2 термоучастка ТПЦ-4 ОАО «НТЗ» [32]. Мнемосхема системы показана на рис. 1.15.

Система обладает следующими возможностями:

- измерения температуры труб на выходе из печей;
- измерения температуры труб после 8 и 14 секции;
- ввод и обработка групповых реквизитов, таких как номер партии, номер плавки, сортаментные признаки;

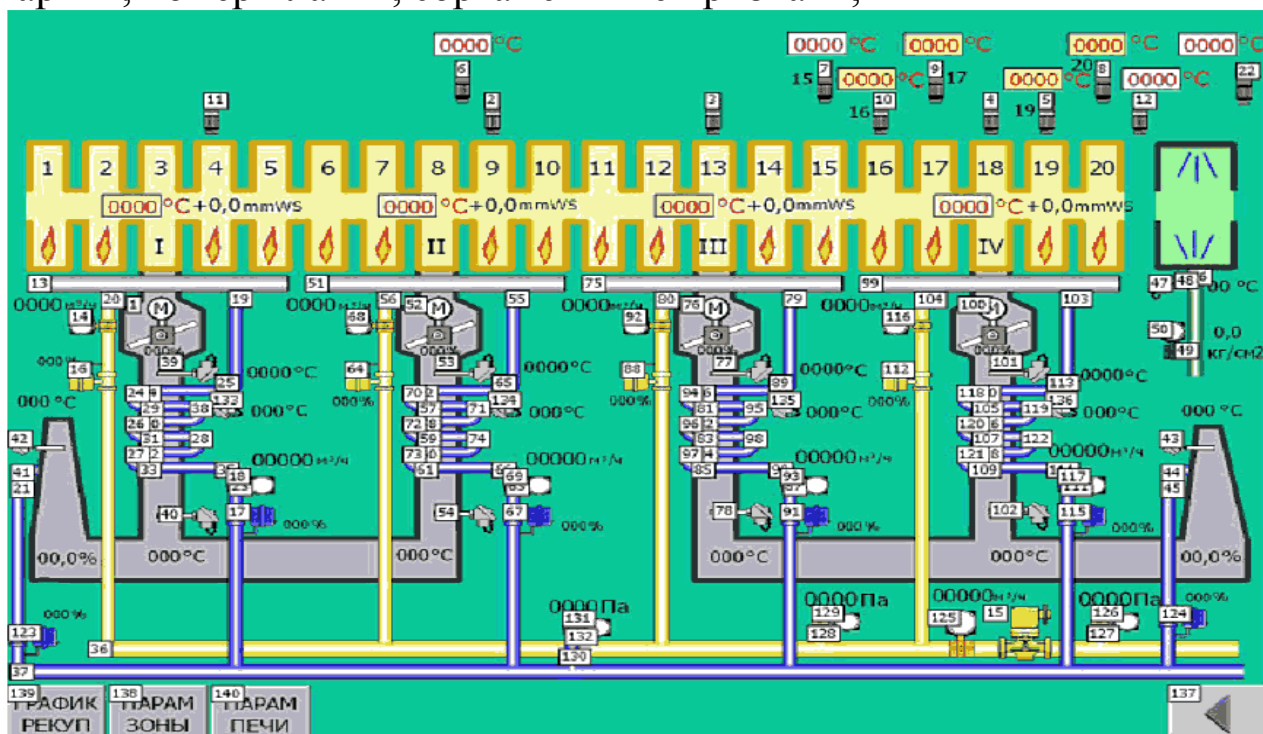


Рис. 1.15. Мнемосхема системы автоматизированного управления секционными печами ТПЦ компании «СР ЛТД»

- оперативный расчет и формирование оптимальных (по критерию минимизации энергозатрат при заданных выходных температурных параметрах заготовок) установок температуры в зонах печи на основании теплофизической модели процесса;
- оперативное регулирование температуры в зонах печей, соотношения газ-воздух с коррекцией по содержанию кислорода в дымовых газах, давления в печи;
- оперативное регулирование общего давления воздуха (методом частотного регулирования приводов нагнетающих вентиляторов);
- оперативное регулирование температуры в зонах печей при нестационарных процессах, возникающих при изменении режима работы печей;

- визуализация процесса, формирование отчетных форм и журналов по расходам и температурам;
- учет расхода газа по сменам, суткам, месяцам, кварталам;
- защита от аварийных режимов, автодиагностика, тестирование;
- возможность ограничения максимальных/минимальных расходов газа по зонам с помощью уставок, водимых с экранных форм, что особо актуально в связи с растущей ценой энергоносителей;
- настройка регуляторов с экранных форм квалифицированным персоналом (запароленная функция);
- архив событий в виде графиков, позволяет оперативно просмотреть все что произошло с печью в течении двух суток;
- расчет удельных энергозатрат на тонну продукции по сортаментам и плавкам – позволяет проанализировать рентабельность производимой продукции с точки зрения потребления энергоносителей;
- система рецептов и режимов работы – «работа», «простой», «пустая печь» – позволяют одним касанием выбрать необходимый режим работы печи.

	I	II	III	IV
Температура в зоне °С	0000	0000	0000	0000
Расход газа м³/ч	00000	00000	00000	00000
Расход воздуха м³/ч	00000	00000	00000	00000
Давление в зоне mmWS	+0,0	+0,0	+0,0	+0,0
Открытие дросселя газа %	000	000	000	000
Открытие дросселя воздуха %	000	000	000	000
Открытие шибера %	000	000	000	000
Содержание кислорода в дыме %	00,00		00,00	
Температура дыма до рекуператора °С	0000	0000	0000	0000
Температура дыма после рекуператора °С	0000	0000	0000	0000
Температура воздуха °С	0000	0000	0000	0000
Температура дыма перед трубой °С	0000		0000	
Открытие дросселя разбавления %	000		000	
Давление газа до клапана Па	0000			
Давление газа после клапана Па	0000			
Давление воздуха Па	0000			
Общий расход газа м³/ч	00000			
Температура трубы после секции 10,°С	0000			
Температура трубы после секции 15,°С	0000			
Температура трубы до спреера °С	0000			
Температура трубы после спреера °С	0000			

1 ГРАФИК ДАВЛ
2 ГРАФИК ТЕМ-ТУР
3 ПАРАМ ЗОНЫ
4 ПЕЧЬ
5 VAR

Температура воды °С
0000

6

Рис. 1.16. Контролируемые параметры системы автоматизированного управления секционными печами ТПЦ компании «СР ЛТД»



Анализ информационно-измерительных систем определения температур внутреннего пространства проходных печей [29-32, 63, 64, 67, 70] показал, что большинство известных систем (например, рис. 1.17) является частью АСУ ТП контроля температуры и выполняет функции измерения и поддержания заранее установленных значений температур. Лишь некоторые системы используют в своей работе теплофизические модели.

В частности, система АСУ ТП кольцевых и секционных печей фирмы «СР ЛТД», осуществляет оперативный расчет и формирование оптимальных установок температуры в зонах печи на основании теплофизической модели процесса по критерию минимизации энергозатрат при заданных выходных температурных параметрах заготовок [32].

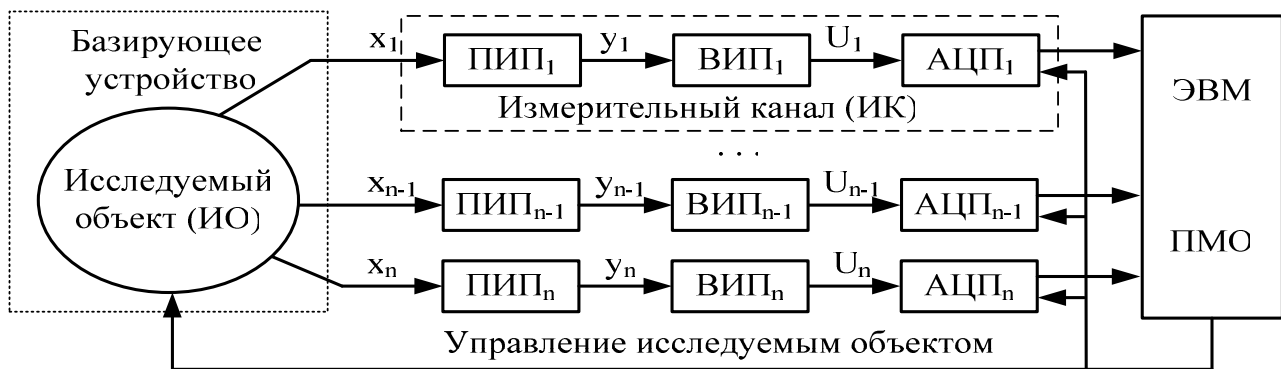


Рис. 1.17. Обобщенная структура ИИС

Недостатком известных систем, как составной части АСУ ТП, является измерение средних температур активных зон, а не температур поверхностей нагреваемых тел, либо температур поверхностей, но только в зонах заключительного нагрева.

В то же время известные системы не используют последние достижения информационных технологий, в частности исследования на базе инженерного комплекса LabVIEW, позволяющие создавать математическую модель и непосредственно исследуемую ИИС в виде виртуального прибора [33, 34]. Структура такого прибора является виртуальной моделью, максимально приближенной к реальной и позволяет выполнить необходимые исследования [35].

## 1.5. Классификация методов моделирования тепловых процессов и функций, выполняемых сертифицированными устройствами. Выводы к главе 1

До недавнего времени для оценки температур нагреваемых в печах тел использовались так называемые тепловые расчеты. Они основывались на составлении теплового баланса для заданных параметров нагрева. Расчет пламенной печи выполняется в следующей последовательности:

- расчет горения топлива;
- определение времени нагрева;
- определение основных размеров печи;
- составление теплового баланса, определение расхода топлива;
- расчет вспомогательного оборудования.

Последовательность расчета методической печи. Определяется состав исходных газов, теплота сгорания газов, расход воздуха, состав продуктов сгорания, суммарный объем продуктов сгорания. Затем определяют энтальпию продуктов сгорания и калориметрическую температуру горения, действительную температуру горения топлива.

Задается температурный профиль печи и поверхностей прогреваемых слябов (распределение температур по длине теплового агрегата), геометрические параметры активной зоны печи. Определяется эффективная длина пути луча, приведенная степень черноты рассматриваемой системы. Находят средний по длине зоны коэффициент теплоотдачи излучением, температурный критерий  $\theta$  и критерий Био, температуру центра сляба.

Определяют время нагрева металла в зоне, степень черноты дымовых газов, приведенную степень черноты зоны, среднюю температуру металла в начале зоны. Находят температурный критерий для поверхности слябов в зоне, время нагрева металла в зоне, температуру центра сляба в конце зоны.

Определение времени томления металла. Для этого находят перепад температур по толщине заготовки в начале томильной зоны, степень выравнивания температур, а затем – время томления.

Начиная с конца прошлого века получает бурное развитие вычислительная техника. В связи этим начинает развиваться компьютерное моделирование теплотехнических процессов. При этом стало возможным реализовывать сложные и подробные математические модели, которые позволяют получать обширную и

разнообразную информацию о процессах, протекающих в тепловых агрегатах. Подходы к компьютерному моделированию эксперимента описаны в работе [36]. Моделирование работы проходной толкательной печи приводится в [37], а моделирование и управление процессами тепловой обработки материалов – в работе [38].

Применение подобных моделей приносит существенный экономический эффект. Себестоимость информации, полученной с их помощью, значительно ниже, чем информации полученной при помощи натуральных исследований на физических моделях, реальных агрегатах, стендах [39]. С помощью математических моделей можно оптимизировать параметры теплового агрегата уже на стадии его проектирования. Модели бывают функциональные, детерминированные и смешанные, сочетающие свойства двух первых [40, 41].

Модели тепловых процессов можно разделить на два типа: физические и математические. Математические, в свою очередь, по типу применяемого математического аппарата на функциональные и детерминированные.

Функциональные математические модели, их еще называют экспериментальными, получают в результате экспериментальных исследований натурального образца. При этом исследуют лишь реакцию системы на подаваемые на вход возмущения (модель черного ящика). Результаты обрабатывают методами математической статистики. Результаты обычно подвергают дальнейшей обработке, получая в итоге регрессионные уравнения.

Экспериментальные модели составляют в три этапа:

1. Создание системы уравнений математической модели объекта.
2. Проведение экспериментальных исследований объекта.
3. Обработка результатов экспериментальных исследований и определение параметров математической модели объекта.

Достоинство – простота. Недостаток – низкая универсальность: для каждого индивидуального объекта необходимо строить свою функциональную модель.

Детерминированные (аналитические) модели: основаны на теоретическом анализе протекающих процессов. Поскольку система уравнений, описывающая процессы не определяет конкретные свойства протекающего процесса, она дополняется условиями, обеспечивающими единственность решения задачи.



Рис. 1.18. Классификационная схема моделей тепловых процессов

Аналитические методы содержат два этапа:

1. Создание системы уравнений математической модели объекта.
2. Получение условий, гарантирующих единственность решения задачи.

Достоинство – универсальность, то есть возможность их использования для различных объектов одного типа, поскольку специфические черты этих различных объектов могут быть учтены в моделях с достаточной степенью подробности. Недостаток – большая сложность.

Промежуточное положение между двумя рассмотренными видами математических моделей занимают модели смешанного типа. Они строятся на основе одного или нескольких уравнений, описывающих механизм наиболее существенных для данного натурального образца процессов. Влияние всех других процессов учитывается с помощью параметров, называемых настроечными коэффициентами. Значения этих параметров определяют с помощью процедуры, которая называется «адаптация модели». При этом расчетные результаты, полученные с использованием математической модели, сопоставляют с результатами измерений, выполненных на образце, а затем находят значения настроечных коэффициентов.

Построение смешанных моделей состоит из трех этапов:

1. Создание системы уравнений математической модели объекта.
2. Проведение экспериментальных исследований объекта.
3. Обработка результатов экспериментальных исследований и определение параметров математической модели объекта.

Теплотехнические и режимные расчеты печей приведены в работе [42], а применение математических моделей в автоматизированных системах управления – в работе [43]. Примеры математического моделирования приведены в [44]. Процесс разработки детерминированной математической модели, численно реализуемой на ЭВМ, включает несколько этапов, которые одновременно представляют собой составляющие структуры модели.

Вначале составляют физическую модель исследуемого процесса или явления. Результаты этого анализа представляют в виде математической формулировки задачи. Обычно это дифференциальные, интегро-дифференциальные либо интегральные уравнения. Сложную исходную систему уравнений часто упрощают на основе обоснованных допущений о характере протекания процесса. В

математическую формулировку задачи входят краевые условия, геометрические и физические параметры задачи.

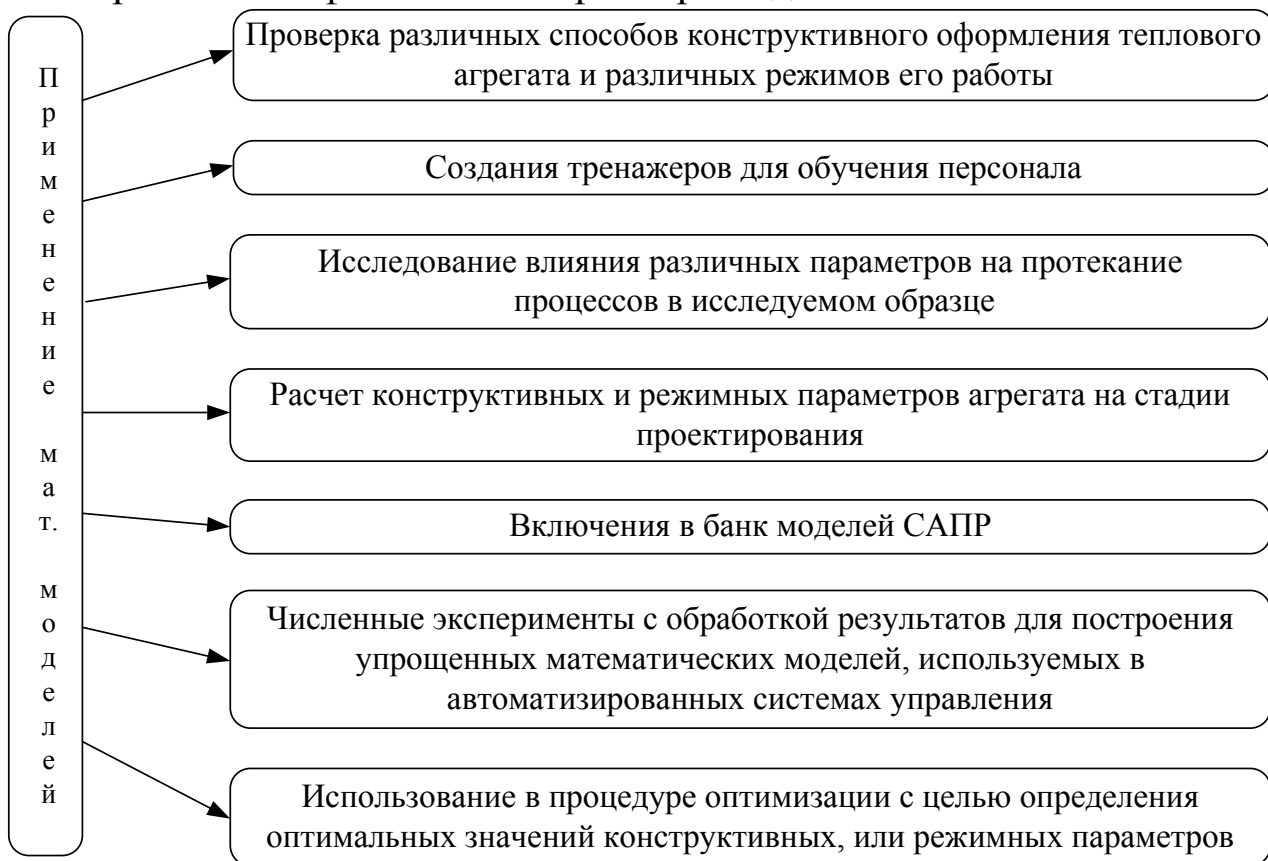


Рис. 1.19. Анализ применения математических моделей

Далее исходные уравнения представляют в виде, удобном для применения численных методов, которые приведены в [45] и [46]. Для этого используется какой-либо метод дискретизации. Если система оказывается нелинейной, в процессе ее решения используют какой-либо итерационный метод. После того, как разработка модели закончена, проверяют ее качество, то есть выполняют проверку адекватности модели. Среди численных методов наиболее часто применяют различные модификации метода конечных разностей и конечных элементов.

В металлургической теплотехнике процесс распространения тепла в теле, подвергаемом тепловой обработке называют термином «внутренний теплообмен». Процессы переноса тепла в рабочем пространстве печи, которые приводят, к поступлению тепла на поверхность нагреваемого тела или к отводу тепла от него в случае охлаждения называют термином «внешний теплообмен».

Математическая модель внешнего теплообмена в высокотемпературных печах значительно усложняется, когда рабочее пространство заполнено излучающим и поглощающим движущимся газом. Такая ситуация имеет место в пламенных печах, где нагрев прямой, а теплогенерация осуществляется за счет сжигания топлива [47]. Сложность таких задач обусловлена наличием излучения и поглощения в газовой среде, наличием множественных переотражений, необходимостью учета тепловыделения при горении, а также весьма существенной ролью конвективного переноса тепла движущимся газом, хотя теплоотдача к нагреваемому материалу осуществляется при этом, главным образом, за счет радиационного теплообмена [48].

Для математического моделирования сложного радиационно-конвективного теплообмена чаще всего также применяют зональные методы. Объем рабочего пространства печи, а также поверхности футеровки и нагреваемого материала разбивают на объемные и поверхностные зоны. Для каждой зоны записывают уравнения теплового баланса, учитывающие для объемных зон радиационный и конвективный теплообмен, конвективную теплоотдачу к поверхности и тепловыделение за счет горения, а для поверхностных зон – радиационную и конвективную теплоотдачу. При этом обязательным является определение обобщенных угловых коэффициентов излучения между зонами. В литературе приводятся методы расчета геометрических угловых коэффициентов излучения для плоских зон. Однако кроме них необходимо иметь значения коэффициентов излучения между поверхностными и объемными зонами, а также между двумя объемными зонами. В результате записи уравнений теплового баланса получают систему нелинейных алгебраических уравнений, которая подлежит численному решению. Такая система аппроксимирует интегро-дифференциальное уравнение с источниками тепла, описывающее радиационно-конвективный теплообмен с тепловыделением, обусловленным горением. Искомой величиной при этом также является результирующий тепловой поток на поверхности нагреваемого материала. Наибольшее практическое значение имеют математические модели, объединяющие задачи как внутреннего, так и внешнего теплообмена в промышленных печах (модели сопряженного теплообмена).

Для их решения используются два различных итерационных алгоритма. Первый заключается в том, что вначале задают

распределение температуры на поверхности обрабатываемого в печи материала. Затем эту температуру используют в качестве граничного условия для решения задачи внешнего теплообмена. В результате получают плотность теплового потока, на этой поверхности. После этого решают задачу внутреннего теплообмена, задавая на поверхности полученную величину плотности теплового потока. Это позволяет найти новое значение температуры на поверхности, которое сравнивают с заданным. Процесс продолжают до тех пор, пока разность между значениями температуры поверхности не окажется приемлемой.

Второй вариант итерационного алгоритма отличается от предыдущего тем, что сопряжение внутренней и внешней задач производят не по температуре, а по плотности теплового потока на поверхности. При этом задачу внешнего теплообмена решают при задании на поверхности металла последней величины, а найденное в результате значение температуры на поверхности используют в качестве граничного условия для решения внутренней задачи. Полученное в результате этого решения значение плотности теплового потока на поверхности сопоставляют с тем, которое использовали на предыдущей итерации, добиваясь приемлемого расхождения этих величин [49].

В предыдущем подразделе анализировались способы, средства и особенности измерения температур в пространстве проходных печей. В данной работе описывается построение ИИС оценки температурного состояния с применением различных сертифицированных устройств, в том числе и СИ температур.

*Таблица 1.2*

**Классификация функций сертифицированных устройств**

Сертифицированное устройство	Выполняемая функция
Поверхностная термопара + Вторичный прибор измерения температуры	Контроль технического состояния кладки и потока тепловых потерь
Погружная термопара + Вторичный прибор измерения температуры	Контроль температур активной зоны печи
Счетчик газа: – датчик расхода газа; – датчик давления газа; – датчик температуры газа;	Определение расхода газа в зоне  Составные части



<p>– преобразователь унифицированного сигнала; – вычислитель расхода газа.</p>	<p>счетчика газа</p>
<p>Газоаналитическая система + Датчик давления атмосферы в печи</p>	<p>Определение парциальных давлений <math>\text{CO}_2</math> и <math>\text{H}_2\text{O}</math> в активной зоне печи</p>

## Выводы к главе 1

1. Промышленные печи – это энерготехнологические агрегаты, которые можно разделить: по типу используемого топлива, способу нагрева обрабатываемых материалов, конструктивными особенностям.
2. Проводить измерения температур рабочего пространства печи и заготовки можно как контактными так и бесконтактными методами.
3. При измерении температур рабочего пространства печи, предпочтение отдается контактными методами.
4. При измерении температур поверхности заготовки предпочтение отдается бесконтактным методам. Для коррекции возмущающих факторов, вносимых излучением промежуточной газовой среды и кладки печи, а также наличием конвективного теплообмена, применяется сложная, охлаждаемая и продуваемая инертными газами, защитная аппаратура пирометра со сложной последующей обработкой полученных данных.
5. Требуемые показатели точности измерения температур поверхностей нагреваемых тел, при помощи пирометров, обеспечиваются лишь в зоне заключительного нагрева.
6. Рассмотренные способы установки контактных и бесконтактных датчиков температуры активной зоны теплового агрегата не обеспечивают гибкости измерения при изменении геометрических размеров нагреваемых в печи тел.
7. анализ ИИС определения температур активной зоны проходных печей показал, что известные системы являются частью АСУ ТП и содержат в своем составе средства измерения и управления, предназначенные только для обеспечения функций низкого уровня. Они не предусматривают оптимизацию процессов определения теплового состояния агрегата с целью повышения качества нагревания заготовок.
8. Недостатком известных систем, как составной части АСУ ТП, является измерение лишь средних температур активных зон контактными датчиками, либо температур поверхностей нагреваемых тел пирометрами в зонах заключительного нагрева.
9. Модели тепловых процессов можно разделить на два основных типа: физические и математические.

10. При построении физических моделей, поведение части их физических величин должно быть подобно поведению величин исследуемого объекта.
11. Математические модели используют для описания процессов протекающих в исследуемом объекте математический аппарат.
12. Математические модели тепловых агрегатов по типу математического аппарата делят на функциональные, детерминированные и смешанные. При этом наибольшее применение находят модели смешанного типа, а по виду решаемых задач теплообмена – задачи сопряженного теплообмена.
13. Сертифицированные устройства, рассматриваемые в данной работе, можно условно классифицировать по типу выполняемой функции: устройства контроля технического состояния кладки и потока тепловых потерь, проходящих через неё; устройства, контроля температур активной зоны печи; устройства определения расхода газа в зоне; устройства определения парциальных давлений  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  в активной зоне печи.
14. На результаты измерения температур внутреннего пространства тепловых агрегатов оказывают влияние процессы испускания и поглощения излучения промежуточной газовой средой, кладкой печи, заготовкой. Кроме того, оказывает влияние геометрия кладки и наличие конвективного теплообмена.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В книге приведен анализ особенностей, связанных с измерением температур внутреннего пространства проходных печей и анализ источников погрешностей измерения. К основным возмущающим факторам следует отнести: наличие сложного радиационно-конвективного теплообмена, не идеальность датчика, а также способа его установки и взаимодействия с исследуемым объектом. При этом требуемые показатели точности измерения температур поверхностей нагреваемых тел обеспечиваются лишь в зоне заключительного нагрева при помощи пирометров, а рассмотренные способы установки датчиков температуры в активной зоне печи не обеспечивают гибкости измерения при изменении геометрических размеров заготовок.

Предложена методика получения геометрических угловых коэффициентов излучения между двумя объемными зонами теплового агрегата, а также между объемными и поверхностными зонами. В данной методике, в качестве элементарной единицы интегрирования, используется бесконечно тонкий параллелепипед. Однако получение коэффициентов по данной методике требует больших затрат машинного времени. В связи с этим, в работе получила дальнейшее развитие методика получения коэффициентов излучения для двух плоских зон. Она может использоваться для получения геометрических угловых коэффициентов излучения между поверхностными и объемными, а также двумя объемными зонами, путем введения дополнительного поправочного коэффициента, зависящего от геометрических параметров активной зоны печи.

Разработана методика оценки технического состояния теплового агрегата в реальном времени, основанная на сравнении значения потоков тепловых потерь получаемых в текущий момент времени, с их значениями для исправного технического состояния кладки. По степени их отличия выносятся решения о начале проведения профилактических и ремонтных работ. Кроме того, значения плотностей потоков тепловых потерь учитываются в модели тепловой работы печи при уточнении значений температурного профиля.

Рассмотрены вопросы повышения точности определения температур нагреваемых тел, путем установления взаимосвязи между температурами на их поверхности и в технологической точке

измерения. Для определения температур в ТТИ применяются методы моделирования нагрева цилиндрических тел в активной зоне тепловых агрегатов при стационарном теплообмене. Результаты применения модели хорошо согласуются с теоретическими выкладками.

Значение систематической составляющей, методической погрешности определения температур поверхности заготовок, определяется как:  $\Delta_{ПЗ} = T_{ТТИМ}(\bar{X}_{ТТИМ}, \bar{B}_{ТТИМ}) - T_{ПЗМ}(\bar{X}_{ПЗМ}, \bar{B}_{ПЗМ})$ . В формуле обозначены: температура в технологической точке измерения, полученная по модели –  $T_{ТТИМ}$ ; вектор входных переменных модели температуры:  $\bar{X}_{ТТИМ}$  – в технологической точке измерения,  $\bar{X}_{ПЗМ}$  – поверхности заготовки; вектор параметров модели: в технологической точке измерения –  $\bar{B}_{ТТИМ}$ , поверхности заготовки –  $\bar{B}_{ПЗМ}$ ; температура поверхности заготовки, полученная по модели –  $T_{ПЗМ}$ .

Построение системы выполнено путем решения таких задач как выявление узких мест известных измерительных систем и способов измерения и их исключения методами:

- использования новых автоматизированных технологий, базирующихся на основе разработанной структуры ИИС в виде виртуального прибора в инженерно-вычислительном комплексе LabVIEW;

- математического моделирования тепловой работы агрегата, с учетом геометрических параметров активной зоны и последующей оценкой распределения температур поверхностей заготовок по длине печи и значениями температур в технологических точках измерения;

- алгоритмической оценки и учета радиационных характеристик газовых объемных зон, путем определения их угловых коэффициентов излучения,

- повышения точности в зоне предварительного нагрева, путем оценки и последующей коррекции систематической составляющей методической погрешности определения температур;

- оценки текущего технического состояния кладки и значений потоков тепловых потерь, при помощи совместного определения температур сторон ограждающих конструкций теплового агрегата;

- повышения точности результата измерений, эффективности использования средств вычислительной техники, создания методик для проектирования приборов и ИИС оценки температурного состояния проходных тепловых агрегатов.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Тепломассообмен / С.И. Гинкул, В.И. Шелудченко, В.В. Кравцов, С.В. Палкина. – Донецк: Норд-Пресс, 2006. – 298 с.
2. Щукин, Алексей Александрович Промышленные печи и газовое хозяйство заводов / А.А. Щукин. – Москва: Энергия, 1973. – 225 с.
3. Mullinger, Peter. Industrial and Process Furnaces: Principles, Design and Operation / Peter Mullinger, Barrie Jenkins. – Butterworth-Heinemann, 2008. – 544с.
4. Porter, Michael. Gas Burners for Forges, Furnaces, and Kilns / Michael Porter. – Skipjack Press, Inc., 2005. – 216 с.
5. Томилин, Е.М. Система управления процессом измерения параметров горения проходной печи / Е.М. Томилин, Н.И. Чичикало // Севергеоэкотех-2011: XII международ. молодеж. науч. конфер., Донецк, 16 марта 2011: тез. докл. / Ухтинский. гос. техн. ун-т. – 2011. – С.144-146.
6. Тымчак, В. М. Справочник конструктора печей прокатного производства. Ч. 1 / Н. И. Иванова, А. А. Перимов, В. М. Тымчак. – М.: Metallurgy, 1970. – 992 с.
7. Электронный каталог изделий фирмы Тесей. Термопары платиновые [Электронный ресурс]. Режим доступа к ресурсу: <http://www.tesey.com/products/catalog/tppt.htm>. – Дата доступа: 21.10.2011 – Название с экрана.
8. Полищук, Евгений Степанович. Измерительные преобразователи / Е.С. Полищук. – К.: Вища Школа, 1981. – 296 с.
9. Атамалян, Эмма Гарегиновна. Приборы и методы измерения электрических величин / Э.Г. Атамалян. – М.: Дрофа, 2005. – 415 с.
10. Буглак, Леонид Иванович. Автоматизация методических печей / Л.И. Буглак. – М.: «Металлургия», 1981. – 197 с.
11. Гордов, Александр Николаевич. Основы пирометрии / А.Н. Гордов. – М.: Metallurgy, 1971. – 447 с.
12. Климовицкий, Михаил Давидович. Оптимизация нагрева заготовок в комплексе «Нагревательные печи прокатный стан» / М.Д. Климовицкий // Сб. рефератов докладов VI Всесоюзного совещания по проблемам управления. – М.: Наука, 1974, С. 156.
13. Климовицкий, Михаил Давидович. Управление нагревом заготовок в металлических печах прокатного стана / М.Д. Климовицкий // Автоматизация металлургического производства. – М.: Metallurgy, 1974, № 3, с. 118-122.

14. Иванцов, Г. П. Нагрев металла / Г.П. Иванцов. – Свердловск: Metallurgizdat, 1948. – 192 с.
15. Рубин, Георгий Кусиелевич. Электрические печи скоростного нагрева / Г.К. Рубин. – М.: Энергия, 1969. – 128 с.
16. Автоматизация методических печей / [Л. И. Буглак, И. Б. Вольфман, С. Ю. Ефроймович и др.]; под ред. М.Д. Климовицкого. – М.: Metallurgiya, 1981. – 198 с.
17. Круашвили, Заурий Евстрофьевич. Автоматизированный нагрев стали / З.Е. Круашвили. – М.: Metallurgiya, 1973. – 328 с.
18. Хакль, Ф. Промышленный метод расчета стационарных тепловых процессов в термических печах / Ф. Хакль, М. Уссар. – [пер. с немецкого "Stahl und Eisen"] // Черные металлы. – 1975. – №24. – С. 20-26.
19. Тышко, А.И. Контроль распределения температуры поверхности металла в трехзонной методической печи / А.И. Тышко, В.К. Еременко // Автоматизация промышленных пламенных печей. – Киев: Техника, 1967. – С. 37-42.
20. Тышко, А.И. Автоматизация промышленных пламенных печей / А. Тышко, В. Еременко. – К.: Техника, 1967. – С. 75-82.
21. Чарихов, Л.А. Автоматизация металлургического производства / Л.А. Чарихов, Л.А. Островский, М.Д. Климовицкий, И.Б. Вольфман // Тематический отраслевой сборник №3 МЧМ СССР. – М.: Metallurgiya, 1974. – С. 129-136.
22. Технологическое задание на технологию производства толстолистового стана 2800 ОАО «Ашинский металлургический завод», 04 июня 2010 г. / НПО «Доникс»; Технический директор.: Д.П. Кукуй и др. – Донецк: 2010. – С. 172
23. Кюркчян, А.М. Некоторые вопросы исследования возможности применения оптических пирометров для измерения температуры поверхности металла в методических печах / А.М. Кюркчян, В.Б. Фейн // Сб. трудов ПКИ «Детоматпром». – Рустави, 1971. – вып. IV.
24. Александров, А.Н. Измерение температуры поверхности металла в пламенных печах пирометром ФЭП-4 / А.Н. Александров, В.Т. Гайдуков // Кузнечноштамповочное производство. – 1972. – № 4. – с. 37-38
25. Hollander, F. Iron and Steel Eng. / F. Hollander, R.L. Huisman //. – 1972. – v. 49, № 9. – С. 43-56.
26. Тышко, А.И. Измерение температуры при автоматизации процессов в черной металлургии / А.И. Тышко, В.Н. Плискач, Д.А.

Скрынченко // Приборы и системы управления. – 1978. – № 5. – С. 37-38.

27. Тышко, А.И. Автоматизация промышленных пламенных печей / А.И. Тышко, В.К. Еременко: Техника. – Киев, 1967. – С. 45-52.

28. Тепловизор [Электронный ресурс]. Режим доступа к ресурсу: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Тепловизор>. – Дата доступа: 21.10.2011 – Название с экрана.

29. НПФ «РЕГМИК». АССОД (Автоматизированная Среда Сбора и Обработки Данных) [Электронный ресурс]. Режим доступа к ресурсу: <http://www.regmik.com/soft.html>. – Дата доступа: 21.12.2011 – Название с экрана.

30. ВИТЦ (Воткинский инженерно-технический центр). Автоматизированная информационная система (АИС) контроля технологических параметров процесса обжига кирпича [Электронный ресурс]. Режим доступа к ресурсу: [http://www.ctanku.ru/automation/articles/avtomatizirovannaya\\_ais\\_objiga\\_kirpycha.html](http://www.ctanku.ru/automation/articles/avtomatizirovannaya_ais_objiga_kirpycha.html). – Дата доступа: 21.12.2011 – Название с экрана.

31. Фирма «Символьт». Система контроля туннельной печи для обжига кирпича [Электронный ресурс]. Режим доступа к ресурсу: <http://www.simvolt.com.ua/rus/articles/view/one/id/119> – Дата доступа: 21.12.2011 – Название с экрана.

32. Сайт компании СР ЛТД. Раздел АСУ ТП секционных печей. Автоматизированная система управления технологическим процессом закалки и отпуска труб в секционных печах №1,2 термоучастка ТПЦ-4 ОАО "НТЗ" [Электронный ресурс]. Режим доступа к ресурсу: <http://www.sr-ltd.com.ua/system-sekcion.html>. – Дата доступа: 21.10.2011 – Название с экрана.

33. Виноградова, Н.А. Разработка прикладного программного обеспечения в среде LabVIEW: Учебное пособие / Виноградова Н.А., Листратов Я.И., Свиридов Е.В.: – М.: Издательство МЭИ, 2005. – 50 с.

34. Автоматизация физических исследований и эксперимента: компьютерные измерения и виртуальные приборы на основе LabVIEW 7 / П.А. Бутырин, Т.А. Васьковская, В.В. Каратаев, С.В. Материнкин. – М.: ДМК-Пресс, 2005. – 264 с.

35. Виртуальный прибор. [Электронный ресурс] Режим доступа к ресурсу: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Виртуальный\\_прибор](http://ru.wikipedia.org/wiki/Виртуальный_прибор). – Дата доступа: 21.10.2011 – Название с экрана.



36. Fang, Kai-Tai. Design and Modeling for Computer Experiments (Chapman & Hall/CRC Computer Science & Data Analysis) / Kai-Tai Fang, Runze Li, Agus Sudjianto. – Chapman and Hall/CRC, 2005. – 304 с.
37. Wilda, D. Modeling and experimental model validation for a pusher-type reheating furnace / D. Wilda, T. Meurera, A. Kugia // Mathematical and Computer Modeling of Dynamical Systems. – 3 June 2009. – С. 209-232.
38. Ткаченко, Валерий Николаевич. Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов / В.Н. Ткаченко. – К.: Наукова думка, 2008. – 243 с.
39. Коздоба, Леонид Алексеевич. Электрическое моделирование явлений тепло- и массопереноса / Л.А. Коздоба. – М.: Энергия, 1972. – 296 с.
40. Лямец, В.И. Системный анализ. Вводный курс / В. Лямец, А. Тевяшев. – [2-е изд. доп. и перераб.]. – Харьков: ХТУРЭ, 2004. – 448 с.
41. Al-Begain, Khalid. Analytical and Stochastic Modeling Techniques and Applications / Khalid Al-Begain, Dieter Fiems, Gábor Horváth // ASMTA 2009: 16th International Conference, Madrid, Spain, June 9-12, 2009, thesis. – Springer, 2009. – 401 с.
42. Теплотехнические расчеты металлургических печей / Под общ. ред. А.С. Телешна. – М.: Металлургия, 1970. – 529 с.
43. Шишмарев, Владимир Юрьевич. Автоматизация технологических процессов / В.Ю. Шишмарев. – М.: Академия, 2005. – 352 с.
44. Robinson, Stewart. Simulation: The Practice of Model Development and Use / Stewart Robinson. – Wiley, 2005. – 336 с.
45. Киреев, В.И. Численные методы в примерах и задачах / В.И. Киреев, А.В. Пантелеев. – М.: Высшая школа, 2008. – 480 с.
46. Пантелеев, А.Б. Методы оптимизации в примерах и задачах / А.Б. Пантелеев, Т.А. Летова. – М.: Высшая школа, 2008. – 544 с.
47. Mahallawy, El. Fundamentals and Technology of Combustion / El-Mahallawy, S. E-Din Habik. – Elsevier Science, 2006. – 862 с.
48. Watson. Radiant Heating and Cooling Handbook / Watson. – McGraw Hill Higher Education, 2008. – 861 с.
49. Арутюнов В. А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей / Арутюнов В. А., Бухмиров В. В., Крупенников С. А. – М.: Металлургия, 1990. – 241 с.
50. Томилин, Е.М. Математическая модель определения угловых коэффициентов излучения объемных и поверхностных зон

- проходных печей / Е.М. Томилин, Н.И. Чичикало // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер., Обчислювальна техніка та автоматизація / Донец. нац. техн. ун-т. – 2010. – Вип. 18(169). – С.126-132.
51. Исаченко, В. П. Теплопередача / Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С.; – М.: Энергия, 1975. – 488 с.
52. Александров, Павел Сергеевич. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры / П.С. Александров. – М.: Наука, 1979. – 511 с.
53. Самарский, Александр Андреевич. Введение в численные методы / А.А. Самарский. – М.: Наука, 1982. – 269 с.
54. Самарский, А.А. Численные методы / А. Самарский, А. Гулин. – М.: Наука, 1989. – 432 с.
55. Поскачей, А.А. Пирометрия объектов с изменяющейся излучательной способностью / А. Поскачей, Л. Чарихов. – М.: Металлургия, 1978. – 199 с.
56. Адрианов, Вадим Николаевич. Основы радиационного и сложного теплообмена / В.Н. Адрианов. – М.: Энергия, 1972. – 464 с.
57. Левченко, Петр Васильевич. Расчеты печей и сушил силикатной промышленности: учеб. пособ. / П.В. Левченко. – М.: Альянс, 2007. – 366 с.
58. Блинов, Евгений Андреевич. Топливо и теория горения. Подготовка и сжигание топлива / Е.А. Блинов. – Санкт-Петербург.: СПУ, 2007. – 256 с.
59. Григорьев, Константин Анатольевич. Технология сжигания органических топлив. Энергетические топлива / К.А. Григорьев. – Санкт-Петербург.: Издательство политехнического университета, 2006. – 93 с.
60. Расчет нагревательных и термических печей / [Василькова С.Б., Генкина М.М., Гусовский В.Л. и др.]; под. ред. В.М. Тымчака. – М.: Металлургия, 1983. – 481 с.
61. Лыков, Алексей Васильевич. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
62. Димніч, А. Х. Теплопровідність / А. Димніч, О. Троянський. – Донецьк: Норд-прес, 2004. – 373 с.
63. ГОСТ 25380-82. Здания и сооружения. Метод измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции – Введ. 1983-01-01. – Научно-исследовательский институт строительной физики (НИИСФ) Госстроя СССР, Институт

- технической теплофизики (ИТТФ) АН УССР, 1983. – 9 с. – (Межгосударственный стандарт).
64. Базаров, Иван Павлович. Термодинамика / И.П. Базаров. – М.: Высшая школа, 1991. – 376 с.
65. Тринкс, Виллиболд. Промышленные печи. Т. 2 / В. Тринкс. – [пер. с англ. М.Н. Грановская, 3-е изд.]. – М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1961. – 392 с.
66. Парсункин, Б.Н. Автоматическое управление тепловым режимом методических печей при изменяющейся производительности стана / Парсункин Б.Н., Иванов Н.И., Обрезков В.А. – Сталь, 1970. – № 7. – С. 657-659.
67. Иванов, Ю.Н. Субоптимальное управление нагревом металла / Ю.Н. Иванов, М.Д. Климовицкий // Известия ВУЗов. «Черная металлургия». – М., 1974, № 5. – С. 166-169.
68. Бельский, В. И. Промышленные печи и трубы / В. Бельский, Б. Сергеев. — М. : Стройиздат, 1974. – 154 с.
69. Томилин, Е.М. Методика контроля технического термодинамического состояния теплового агрегата / Е.М. Томилин, Н.И. Чичикало // Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси (ІРТК-2011): четверта міжнарод. наук.-практ. конф., Київ, 25 трав. 2011: тез. докл. / Національний авіаційний університет. – 2011. – С.222-224.
70. Томилин, Е.М. Методика экспертной оценки технического состояния кладки теплового агрегата / Е.М. Томилин, Н.И. Чичикало // Інформаційні технології і сучасність: VIII міжвуз. наук.-практ. конфер. студ. та молодих вчених, Донецьк, 18 трав. 2011: тез. докл. / Європейський. ун-т. – 2011. – С.8-10.
71. Томилин, Е.М. Разработка модели идентификации теплового обмена процессов в проходной печи / Е.М. Томилин, Н.И. Чичикало // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2008. – Вып. 31, № 1/4: Математика и кибернетика – фундаментальные и прикладные аспекты. – С.59-64.
72. Волкова, Б.Н. Теория систем / Б. Волкова, А. Денисов. – М.: Высшая школа, 2006. – 511 с.
73. Раннев, Георгий Георгиевич. Измерительные информационные системы / Г.Г. Раннев. – М.: Академия, 2010. – 336 с.

74. Схемотехника электронных систем. Микропроцессоры и микроконтроллеры / [Бойко В.И., Гуржий А.Н., Жуйков В.Я., и др.]; под ред. В.И. Бойко. – Петербург: БХВ-Петербург, 2004. – 454 с.
75. Джексон, Р. Г. Новейшие датчики / Р.Г. Джексон. – М.: Техносфера, 2007. – 384 с.
76. Рубичев, Николай Александрович. Измерительные информационные системы / Н.А. Рубичев. – М.: Дрофа, 2010. – 334 с.
77. Оппенгейм, А. Цифровая обработка сигналов / А. Оппенгейм, Р. Шафер. – [2-е изд.]. – М.: Техносфера, 2007. – 856 с.
78. Інформаційні технології в інформаційно-вимірювальних системах / В.П. Бабак, В.В. Дегтярьов, Ю.В. Куц, С.Ф. Філоненко. – К.: НАУ, 2005. – 108с.
79. Тимофеев, Борис Борисович. Перспективы и проблемы создания АСУТП на базе микропроцессорной техники / Б.Б. Тимофеев // Приборы и системы управления. – 1981. – № 8. – с. 1-3.
80. Карабутов, Николай Николаевич. Адаптивная идентификация систем. Информационный синтез / Н.Н. Карабутов. – М.: Едиториал УРСС, 2006. – 384 с.
81. Путилин, Александр Борисович Путилин. Вычислительная техника и программирование в измерительных системах / А.Б. Путилин. – М.: Дрофа, 2006. – 416 с.
82. Коломиец, Л.В. Пример реализации структуры управления проходной печью / Л.В. Коломиец, Е.М. Томилин, Н.И. Чичикало // Вісн. Інженерної академії України / Інженерна академія України – Київ, 2008. – Вип. 3-4. – С. 90-92
83. Томилин, Е.М. Автоматизированная система диагностики и поддержания температурного профиля проходной печи / Е.М. Томилин, Н.И. Чичикало, Е.Ю. Купцова // Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси (ПРТК-2009): друга міжнарод. наук.-практ. конф., Київ, 25 трав. 2009: тез. докл. / Національний авіаційний університет. – 2009. – С.219-220.
84. Томилин, Е.М. Способ определения температурного профиля проходных пламенных печей и структурной схемы ИИС / Е.М. Томилин, Н.И. Чичикало // Автоматизація технологічних об'єктів та процесів. Пошук молодих: XI міжнарод. наук.-техніч. конф. аспір. і студ., Донецьк, 17 трав. 2011: тез. докл. / Донец. нац. техн. ун-т. – 2011. – С.228-230.
85. Фрайден, Дж. Современные датчики: справочник / Дж. Фрайден. – М.: Техносфера, 2005. – 592

86. Электронный каталог изделий фирмы АОЗТ ТЭРА. Разъемы для термопреобразователей [Электронный ресурс]. Режим доступа к ресурсу: [http://ao-tera.com.ua/product\\_list/ru/t-connectors/295.html](http://ao-tera.com.ua/product_list/ru/t-connectors/295.html). – Дата доступа: 21.10.2011 – Название с экрана.
87. Чичикало, Н.И. Способ повышения точности измерения э.д.с. термопар при ненулевом значении температуры холодного спая / Н.И. Чичикало, В.Ю. Ларин, Е.М. Томилин // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер., Обчислювальна техніка та автоматизація / Донец. нац. техн. ун-т. – 2006. – Вип. 106. – С.213-219.
88. Электронный каталог изделий фирмы АОЗТ ТЭРА. Поверхностные термопреобразователи [Электронный ресурс]. Режим доступа к ресурсу: <http://ao-tera.com.ua/pages/ru/surface/111.html>. – Дата доступа: 21.10.2011 – Название с экрана.
89. ДСТУ 2837-94 (ГОСТ 3044-94). Перетворювачі термоелектричні. Номінальні статичні характеристики перетворення = Преобразователи термоэлектрические. Номинальные статические характеристики преобразования. – Введ. 1997-01-01. – Львів.: Держстандарт України, 1995. – 219 с. – (Національні стандарти України).
90. Электронный каталог изделий фирмы Тесей. Термопары платиновые [Электронный ресурс]. Режим доступа к ресурсу: <http://www.tesey.com/products/catalog/tppt-tech.htm>. – Дата доступа: 21.10.2011 – Название с экрана.
91. Электронный каталог изделий фирмы ICPDAS Co, LTD [Электронный ресурс]. Режим доступа к ресурсу: <http://www.icpdas.ru/good/listAll/15245/>. – Дата доступа: 21.10.2011 – Название с экрана.
92. Электронный каталог инженерно-производственной фирмы ОАО "Сибнефтеавтоматика". Счетчик газа вихревой СВГ.М. [Электронный ресурс]. Режим доступа к ресурсу: <http://www.sibna.ru/ru/production/2/2/>. – Дата доступа: 21.10.2011 – Название с экрана.
93. Электронный каталог инженерно-производственной фирмы ОАО "Сибнефтеавтоматика". Датчик расхода газа зондового типа ДРГ.МЗ(Л) [Электронный ресурс]. Режим доступа к ресурсу: <http://www.sibna.ru/ru/production/2/1/>. – Дата доступа: 21.10.2011 – Название с экрана.
94. Электронный каталог изделий фирмы Метран. Датчики давления [Электронный ресурс]. Режим доступа к ресурсу:

[http://www.metran.net/%D2%E5%F5%E4%EE%EA%E8/%D1%F0%E5%E4%F1%F2%E2%E0%20%E8%E7%EC%E5%F0%E5%ED%E8%E9/%C4%E0%F2%F7%E8%EA%E8\\_%E4%E0%E2%EB%E5%ED%E8%FF/%CA%E0%F2%E0%EB%EE%E3/](http://www.metran.net/%D2%E5%F5%E4%EE%EA%E8/%D1%F0%E5%E4%F1%F2%E2%E0%20%E8%E7%EC%E5%F0%E5%ED%E8%E9/%C4%E0%F2%F7%E8%EA%E8_%E4%E0%E2%EB%E5%ED%E8%FF/%CA%E0%F2%E0%EB%EE%E3/). – Дата доступа: 21.10.2011 –

Название с экрана.

95. Электронный каталог изделий фирмы АОЗТ ТЭРА.

Преобразователи унифицированных сигналов [Электронный ресурс]. Режим доступа к ресурсу: <http://ao-tera.com.ua/pages/ru/transmitter.html>. – Дата доступа: 21.10.2011 – Название с экрана.

96. Электронный каталог фирмы ЦФТИ "АНАЛИТИК".

Газоаналитические системы "Гранат" [Электронный ресурс]. Режим доступа к ресурсу: [http://www.gas-granat.ru/equipment\\_granat.php](http://www.gas-granat.ru/equipment_granat.php). – Дата доступа: 21.10.2011 – Название с экрана.

97. Электронный каталог изделий фирмы Метран. Датчики давления Rosemount 3051 [Электронный ресурс]. Режим доступа к ресурсу: <http://www.metran.com/products/siz/dad/Pressure-Transmitters/ros/>. – Дата доступа: 21.10.2011 – Название с экрана.

98. Электронный каталог изделий фирмы Тесей. Адаптеры термодарные АТхх [Электронный ресурс]. Режим доступа к ресурсу: <http://www.tesey.com/products/catalog/connect-8.htm>. – Дата доступа: 21.10.2011 – Название с экрана.

99. Чичикало, Н.И. Проектирование блоков формирования законов регулирования для приборов контроля и управления технологическими процессами / Н.И. Чичикало, Н.Г. Винниченко, Е.М. Томилин // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер., Обчислювальна техніка та автоматизація / Донец. нац. техн. ун-т. – 2009. – Вип. 17(148). – С.69-77.

100. Вайсбанд, М.Д. Техника выполнения метрологических работ / М.Д. Вайсбанд, В.И. Проненко. – К.:Техніка,1986. – 166 с.

101. Назаров, Николай Григорьевич. Метрология. Основные понятия и математические модели / Н.Г. Назаров, – М.: Высшая школа, 2002. – 348 с.

102. L. Severance, Frank. System Modeling and Simulation: An Introduction / Frank L. Severance. – Wiley, 2005. – 518 с.

103. Томилин, Е.М. Разработка модели идентификации теплового обмена в проходной печи и его регулирования при помощи SCADA систем / Е.М. Томилин, Н.И. Чичикало // Вісн. Інженерної академії України / Інженерна академія України – Київ, 2008. – Вип. 2. – С. 149-155

104. Brebbia, C.A. Computational Methods and Experimental Measurements XIII / C.A. Brebbia, G.M. Carlomagno. – WIT Press, 2007. – 928 с.
105. Линевер, Фриц. Измерение температуры в технике / Ф. Линевер. – М.: Металлургия, 1980. – 843 с.
106. Артемьев, Б.Г. Поверка и калибровка средств измерений / Б. Артемьев, Ю. Лукашов. – М.: ФГУП "СТАНДАРТИНФОРМ", 2006. – 406 с.
107. ДСТУ 3215-95 Метрологія. Метрологічна атестація засобів вимірювальної техніки. Організація та порядок проведення = Метрология. Метрологическая аттестация средств измерительной техники. Организация и порядок проведения. – Введ. 01.07.1996. – ХДНДІМ: Держстандарт України, 1995. – 34 с. – (Національні стандарти України).
108. ДСТУ 3989-2000 Калібрування засобів вимірювальної техніки. Основні положення, організація, порядок проведення та оформлення результатів = Калибровка средств измерительной техники. Основные положения, организация, порядок проведения и оформления результатов. – Введ. 25.09.2000. – ХГНИИМ: Держстандарт України, 2000. – 8 с. – (Національні стандарти України).
109. ДСТУ 2708-2006 Повірка засобів вимірювальної техніки. Організація та порядок проведення = Поверка средств измерительной техники. Организация и порядок проведения. – Введ. 03.02.2006. – Укрметртестстандарт: Держстандарт України, 2005. – 18 с. – (Національні стандарти України).
110. Электронный каталог изделий фирмы Datapaq. Тепловые барьеры Thermal barriers [Электронный ресурс]. Режим доступа к ресурсу: [http://www.datapaq.com/Datapaq/en-r0/Products/Furnace+Tracker+Systems/Furnace+Tracker/ThermalBarriers.htm](http://www.datapaq.com/Datapaq/en-r0/Products/Furnace+Tracker+Systems/Furnace+Tracker+Systems/Furnace+Tracker/ThermalBarriers.htm). – Дата доступа: 21.10.2011 – Название с экрана.
111. Настройка параметров ПИД-закона в регуляторах температуры МикРА [Электронный ресурс]. Режим доступа к ресурсу: <http://my.elvisti.com/show/tune1.html>. – Дата доступа: 21.10.2011 – Название с экрана.
112. ПИД-закон регулирования. Методы нахождения ПИД коэффициентов [Электронный ресурс]. Режим доступа к ресурсу: <http://www.termodat.ru/pdf/pid.pdf>. – Дата доступа: 21.10.2011 – Название с экрана.