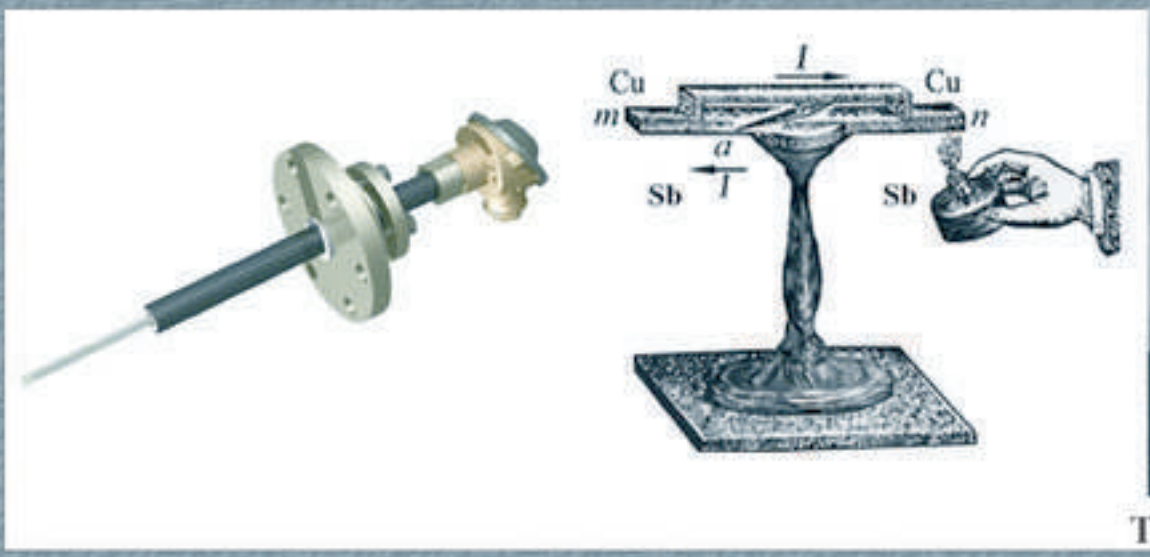
ISSN 0135-5910 (Print)
ISSN 2619-0753 (Online)

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Бюллетень научно-технической и экономической информации

ОТКРЫТИЮ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА 200 ЛЕТ



Томас Иоганн Зеебек

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕРМОПАРАМИ – ГЛАВНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Ferrous Metallurgy

Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information

Том 77. № 4

2021

ISSN 0135-5910 (Print)
ISSN 2619-0753 (Online)

ОАО “Центральный научно-исследовательский институт информации
и технико-экономических исследований черной металлургии”

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

БЮЛЛЕТЕНЬ научно-технической и экономической информации

Журнал включен в перечень научных изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук

**Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия
Регистрационный номер ПИ № 77-18479**

Издается с 1944 года, ежемесячно

Том 77, № 4 **2021**

Москва,
ОАО «Черметинформация»

УДК 669.1

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ — ГЛАВНАЯ ЗАДАЧА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МЕТАЛЛУРГИИ

К 200-летию открытия термоэлектрического эффекта Т.И. Зеебеком

А. М. БЕЛЕНЬКИЙ [1], д-р техн. наук, профессор кафедры "Металлургия цветных металлов и автоматизации металлургических процессов", belenky.bam@yandex.ru; А. Н. БУРСИН [2], дипломированный инженер; А. А. УЛАНОВСКИЙ [2], канд. техн. наук, директор; С. И. ЧИБИЗОВА [3], канд. техн. наук, доцент кафедры "Энергоэффективные и ресурсосберегающие промышленные технологии"
([1] Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Россия, Республика Северная Осетия – Алания, г. Владикавказ;
[2] ООО "Обнинская термоэлектрическая компания", Россия, Калужская обл., г. Обнинск;
[3] Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", Россия, г. Москва)

Аннотация. Температура — один из основных параметров в жизни человечества, и особенно в черной металлургии. После открытия термоэлектрического эффекта Т.И. Зеебеком и создания термоэлектрического термометра получение стали превратилось из искусства в высококвалифицированный труд. Показано, что термопары имеют значительные преимущества перед другими датчиками температуры: пирометрами излучения и термометрами сопротивления. Рассмотрены вопросы измерения температуры в черной металлургии. Дана классификация методов контроля температуры в технологических процессах черной металлургии. Приведены некоторые результаты исследований промышленных нагревательных печей станов горячей прокатки, камерных, колпаковых и протяжных печей, выполненных на кафедре "Теплофизика и экология металлургического производства", в центре "ЭНЕРГОМЕТ", на малом предприятии "Инновации и энергосбережение", в лаборатории "Теплотехнические измерения в металлургии" НИТУ "МИСиС", в ООО "Обнинская термоэлектрическая компания". Приведены примеры измерения температуры в нагревательных и термических печах прокатного производства. Представлена конструкция термометра для измерения температуры в токсичной или взрывоопасной атмосфере, основанная на методе пульсирующей конвективной термометрии газа, разработанная в МИСиС. Данный прибор обеспечил достаточно точное измерение температуры газа на действующих печах и позволил организовать правильную подачу защитного газа в камеры нагрева, выдержки и его эффективное движение в рабочем пространстве, что увеличило интенсивность процесса обезуглероживания трансформаторной стали в башенных печах.

Ключевые слова: открытие термоэлектрического эффекта Т.И. Зеебеком, измерение температуры, термоэлектрический термометр, методы контроля температуры в металлургии, нагревательные и термические печи, агрегат непрерывного отжига.

Ссылка для цитирования: Беленький А.М., Бурсин А.Н., Улановский А.А., Чибизова С.И. Измерение температуры — главная задача обеспечения технологических процессов в металлургии. К 200-летию открытия термоэлектрического эффекта Т.И. Зеебеком // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2021. Т. 77. № 4. С. 393-405.

Doi: 10.32339/0135-5910-2021-4-393-405

TEMPERATURE MEASUREMENT – THE MAIN TASK TO ENSURE TECHNOLOGICAL PROCESSES IN STEEL INDUSTRY

Towards the 200 years anniversary of the thermoelectric effect discovery by T.I. Zeebeck

A. M. BELEN'KII [1], HD (Tech.), Prof., Dpt. "Metallurgy of nonferrous metals and automation of metallurgical processes", belenky.bam@yandex.ru; A. N. BURSIN [2], graduate engineer; A. A. ULANOVSKII [2], PhD (Tech.), Director; S. I. CHIBIZOVA [3], PhD (Tech.), Prof. Ass., Dpt. "Energy-effective and resources-saving industrial technologies"
([1] North Caucasian Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Russia, Republic of Northern Ossetia – Alaniya, Vladikavkaz; [2] OJSC "Obninsk thermos-electric company", Russia, Kaluga rgn., Obninsk;
[3] National Research Technological University "MISiS", Russia, Moscow)

Abstract. Temperature is one of the basic parameters in the life of the mankind and particularly in steel industry. After discovery of thermoelectric effect by T.I. Zeebeck and creation of the thermoelectric thermometer, production of steel was transformed from an art into a highly qualified labor. It was shown, that thermocouples have considerable benefits comparing with other temperature sensors: radiation pyrometers and resistance thermometers. Items of temperature measurement in steel industry considered. Methods of temperature control in technological processes of steel industry qualified. Some results of studies of industrial heating furnaces of

hot-rolling mills, chamber, bell-type and continuous furnaces presented. The studies were accomplished at the Department “Thermal physics and ecology of metallurgical production”, in the center “ENERGOMET”, at the enterprise “Innovations and energy saving”, in the laboratory “Heat engineering measurements in metallurgy” of NITU “MISiS”, in OJSC “Obninsk thermoelectric company”. Examples of temperature measurement in heating and thermal furnaces of rolling mills presented. Design of a thermometer for temperature measurement in a toxic or highly explosive atmosphere presented, based on a method of pulsating convection thermometry of a gas, developed at MISiS. The device ensured accurate enough gas temperature measurement in operating furnaces and enabled to organize a correct supply of a protective gas into the heating chamber, exposure and its effective motion in the working area resulting in increasing intensity of decarburization process of transformer steel in tower furnaces.

Key words: discovery of thermoelectric effect by T.I. Zeebeck, temperature measurement, thermoelectric thermometer, temperature control methods in metallurgy, heating and thermal furnaces, continuous annealing line.

For citation: Belen’kii A.M., Bursin A.N., Ulanovskii A.A., Chibizova S.I. Temperature measurement – the main task to ensure technological processes in steel industry. Towards the 200 years anniversary of the thermoelectric effect discovery by T.I. Zeebeck. *Chernaya metallurgiya. Byulleten’ nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2021, vol. 77, no. 4, pp. 393-405. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2021-4-393-405

Первое, что человек начал осознавать в окружающей его среде (после добычи еды и защиты от врагов) — это ее тепловое состояние или температура. Тепловые условия заставили его поддерживать костер в пещере и изобрести теплую защитную одежду. Он научился строить теплое жилище, и температура отошла на второй план. Главное — еда, урожай и оружие для сохранения и защиты племени, рода, города и государства. Первым термометром являлся фактически сам человек. Два органа чувств, а именно осязание и зрение, служили ему для оценки теплового состояния вокруг. Причем вначале осязание: ладонь руки, щеки, открытые участки тела. Человек различал тепло как “жарко”, “тепло”, “прохладно”, “холодно”.

Развитие производства металлов привело к возникновению умения — искусства мастеров-металлургов определять по цвету расплава или изделия при его ковке “правильное” или “неправильное” температурное состояние. Наиболее ярко это умение выразил выдающийся русский ученый-металлург Д.К. Чернов: “Не имев возможности измерять эти температуры при помощи физических приборов, я по необходимости ограничился их обозначением по цвету каления, все оттенки которого может различить лишь опытный глаз”.

Так было открыто получение металлов, вершиной которого следует считать освоение производства уникальной дамасской стали, а также получение демидовскими металлургами (без единого измерительного инструмента, кроме весов для набора шихты) высококачественного стального листа марки “черный соболь”. Практически без измерения, основываясь на опыте и знаниях, передаваемых мастерами из поколения в поколение, искусные люди — мастера, создавали фундамент цивилизации.

В дальнейшем с развитием науки и техники появилась необходимость определения не качественного, а количественного уровня теплового состояния изделия, устройства или установки (промышленной или лабораторной печи). И ученые создали новый инструмент (после приборов для контроля геометрических размеров, массы, скорости, расстояния, уровня, времени). Данный прибор был назван термометром и позволил контролировать тепловое состояние предмета — его температуру.

В 1597 г. Галилео Галилей создал первый в мире термометр — “термоскоп” [1]. Реомюр, Фаренгейт, Цельсий создали жидкостные стеклянные термометры со шкалой, по которой можно было определять значение контролируемой температуры [1]. Наибольшее распространение получила шкала Цельсия. Однако стеклянные термометры имели лишь ограниченное применение из-за хрупкости конструкции и относительно небольшого измеряемого интервала температуры.

В 1821 г. немецкий ученый Т.И. Зеебек в Дерптском университете (сейчас г. Тарту) сделал выдающееся открытие: он обнаружил, что в замкнутой цепи, состоящей из двух разнородных металлических проводников, при различных температурах спаев T_1 и T_2 появляется термоэлектродвижущая сила, которая зависит только от характеристик металлов и величины перепада температур и обеспечивает протекание в цепи электрического тока. Французский ученый Ле-Шателье в 1886 г. создал термопару с электродами платина–родий (10 % Rh)–платина и выполнил измерение температуры с ее помощью в процессе термического анализа минералов [2].

Планком, Стефаном, Больцманом и Вином были сформулированы законы излучения абсолютно черного тела, которые явились математическим обоснованием методов радиационной пирометрии, на основе которых созданы бесконтактные измерители температуры: пирометры полного (ППИ), частичного излучения (ПЧИ) и спектрального отношения (ПСО) [3, 4].

Практически все в науке и технике, на Земле и в космосе контролируется, а затем и управля-

ется на базе измерительных систем, использующих для контроля температуры термопару. Термоэлектрические термометры (ТТ) различного типа и конструкции обеспечивают возможность контроля температуры в широком интервале: от –273 до +2800 °С и выше. Они являются основой получения точных, объективных и достоверных данных о тепловых процессах, протекающих в природе, при научных исследованиях, в агрегатах и технологических комплексах металлургии, промышленности и энергетики.

Термопары имеют значительные преимущества перед другими датчиками температуры: пирометрами излучения (ПИ) и термометрами сопротивления (ТС). Они не нуждаются в источнике питания, контролируют температуру в точке, при потенциометрической схеме измерения электрическое сопротивление материала термопары, компенсационных и соединительных проводов не влияет на точность измерения, размеры спая термопары и диаметр термоэлектродов могут измеряться в микрометрах (что исключительно важно при контроле криогенных процессов). ПИ имеют значительную методическую погрешность, связанную с неизвестной степенью черноты объектов. Даже наиболее точный из них — пирометр спектрального отношения — может давать большую ошибку при реальных значениях спектральной степени черноты [3].

Появление в начале XX в. большого количества разнообразных приборов повлекло за собой создание международной системы единиц измерения и новой науки — метрологии. Русский академик Б.С. Якоби красиво и исчерпывающе сказал про главную черту, без которой не может существовать цивилизация: “Искусство измерения является могущественным оружием, созданным человеческим разумом для проникновения в законы природы и подчинения ее сил нашему господству”. Поэтому можно сказать, что нынешнее время характеризуется не только развитием биотехнологии, нанотехнологии, робототехники, искусственного интеллекта, но и бурным развитием измерительной техники, без которой это все практически не может быть осуществлено и дальше развиваться.

Главным конструкционным материалом XXI в. останется сталь [5]. Динамика мирового производства стали, млн т/год: 1970 г. — 595, 1990 г. — 788, 2000 г. — 829, 2004 г. — 1046 (впервые превышен уровень производства в 1 млрд т), 2019 г. — 1849 [6]. Несмотря на многочисленные попытки расширить использование других материалов, сталь сохранила за собой лидирующие позиции.

В металлургии, промышленности, энергетике, особенно на атомных электростанциях, эксплуатируется громадное количество ТТ, отличающихся по методу измерения, точности. Необходимо учитывать взаимодействие средства измерения с объектом контроля и агрегатом, в котором осуществляются и технологический процесс, и измерение его параметров [7–15].

Первая атомная электростанция (АЭС) была создана в СССР под руководством академика И.В. Курчатова в 1954 г. в г. Обнинске. В работе [15] отмечается, что “почти 20 % измерительной информации на атомных станциях получают с помощью первичных температурных преобразователей”. Каждый градус при оценке степени нагрева теплоносителя в реакторах буквально на вес золота. Без надежного температурного контроля невозможна эксплуатация высокотемпературных ядерных преобразовательных установок. На АЭС, кораблях, ледоколах, подводных лодках и ядерных ракетных установках эксплуатируется громадное количество ТТ как стандартного типа, так и специально разработанных для данной отрасли: молибден-рениевых, вольфрам-рениевых. В настоящее время имеются специальные ТТ ВР-5/20 с электродом ВР5, легированным наночастицами Y_2O_3 [0,05 % (мас.)], что обеспечивает более высокую стабильность данного термоэлектрода [16]. На начало 2020 г. количество блоков АЭС в мире составляло 449 шт. (США — 96, Франция — 58, Китай — 48, Россия — 37). Проектируются и строятся новые, причем в значительной мере усилиями России. Можно сделать вывод о том, что в силу специфики измерение температуры в атомной промышленности — это решенная научно-техническая задача, которая перестала быть проблемой [15].

На металлургических и машиностроительных предприятиях эксплуатируется громадное количество тепловых агрегатов и печей, которые характеризуются большой производительностью, значительной энергетической мощностью, высокими температурами, агрессивностью и взрывоопасностью газовой атмосферы, в том числе и водородной, высокими скоростями протекающих процессов теплообмена, включающего излучение, конвекцию и теплопроводность. Все это повлекло создание различных, весьма сложных и разветвленных систем контроля и автоматического управления.

Новейший технологический уклад характеризуется ключевой ролью глобальных информаци-

онных сетей, ростом числа систем искусственного интеллекта при дальнейшем развитии технологий, материалов с заданными свойствами, полной гибкой автоматизацией и роботизацией производства. Измерение — процесс получения информации, заключающийся в сравнении опытным путем контролируемых и известных величин, выполнения логических операций и представления информации в форме, удобной для восприятия и передачи. Этот процесс — акт взаимодействия компонентов измерительной системы с объектом контроля, в том числе с влиянием субъекта измерения (человека, контролирующего процесс) и воздействием на него окружающей среды. На рис. 1 представлена схема и структура операций измерения [3].

В соответствии с причинами возникновения погрешности контроля подразделяются на инструментальные и методические ошибки, связанные с отклонением условий измерения от установленных. Следует также выделить погрешность самого объекта в процессе измерения, особенно в быстротекущих процессах. По характеру проявления различают систематические, случайные, постоянные, прогрессирующие и периодические ошибки. Вышесказанное позволяет сделать не совсем очевидный для большого количества специалистов, в том числе и для эксплуатационного персонала, вывод об исключительно сложном характере процесса измерения.

На рис. 2 представлена структура и задачи функционирования печного агрегата как автоматизированного технологического комплекса (АТК).

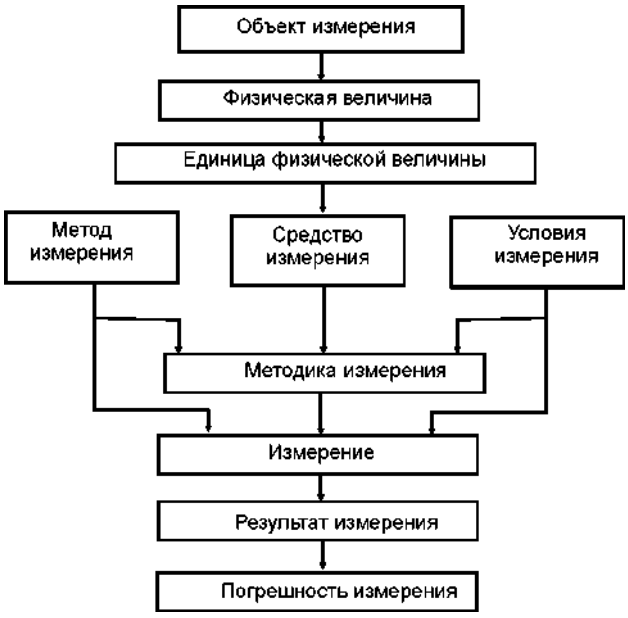


Рис. 1. *Структурная схема выполнения операции измерения*

Fig. 1. *Structure diagram of measuring operation fulfilment*

Рис. 2. *Структура и задачи металлургического печного агрегата*

Fig. 2. *Structure and tasks of a metallurgical furnace facility*

Из рассмотрения схемы следует, что основой практически всех технологических АТК являются теплотехнические процессы, реализуемые на базе управления процессами выделения теплоты и процессами теплопередачи с необходимым контролем температурного режима. Основные объекты контроля температуры в промышленных агрегатах:

1. Сыпучие материалы: руда, агломерат, окатыши, флюсы, кокс, уголь, сухие шлаки и шламы, клинкер, известь и т. п.

2. Шихта в печах, шихта на спекательных тележках агломашин, кокс на рампах тушильных вагонов и в установках сухого тушения и т. п.

3. Металл (жидкий и твердый) в технологических печных агрегатах, ковшах, желобах, на стане, адъюстажах, с покрытиями, с наличием окалины и т. п.

4. Температура отдельных зон агрегата или установки.

5. Элементы печей, лопатки турбин, ТВЭЛы в АЭС и т. п.

6. Шлаки в печах, желобах, ковшах и т. п.

7. Газовая атмосфера в печах, газы в трубопроводах, боровах, в том числе агрессивные, взрывоопасные, токсичные.

8. Вода и пар в котлах, турбинах, трубопроводах, резервуарах, системах нагрева и охлаждения.

9. Огнеупорная футеровка в агрегатах и огнеупорные материалы в процессе их производства.

10. Элементы агрегатов и установок: кожух, ролики, фундаменты, электронагреватели, радиантные трубы, рекуператоры, регенераторы и т. п.

11. Трубы: воздухо- и газопроводы, водо- и паропроводы.

12. Дымовые трубы.

13. Место проведения процесса измерения: в агрегате, на рабочей площадке у агрегата, в помещении теплового щита, в специальной лаборатории.

14. Характер процесса измерения: статический, динамический, непрерывный, дискретный.

15. Вид процесса получения результата измерения: прямой, косвенный.

16. Интервал температур измерения: низкотемпературный (–273…+200 °С); среднетемпературный (+200…+800 °С); высокотемпературный (+800…+2800 °С) и более.

17. Временной интервал процесса измерения: оперативный — экспресс-анализ; непрерывное измерение в процессе функционирования агрегата.

Практически все средства измерения температуры можно разделить на три большие группы:

1. Стандартные установки, используемые во многих отраслях производства, которые реализуются на базе типовых решений с применением серийно изготавливаемых термометров.

2. Специальные установки и методы измерения, в которых используются в основном серийные датчики температуры, но в которых условия измерения температуры очень сложны из-за специфики работы агрегата и состояния объекта контроля.

3. Принципиально новые методы и средства контроля температуры параметров процессов, которые раньше не измерялись в силу ряда причин, в том числе и объективных, и субъективных.

Обеспечение заданного температурного и теплового режимов работы печного агрегата — основная цель функционирования АСУТП АТК. Правильный температурный режим обеспечивает: получение необходимого качества готовой продукции (в том числе структуры металла и сплава), эффективное сжигание топлива (исключение его перерасхода и минимальные экологически вредные выбросы), пониженное образование окалины, минимальное разрушающее тепловое воздействие на конструкцию печи и т. п.

Температура является интегральной величиной, определяющей достижение необходимого качества или его повышения в условиях действующего агрегата, необходимой производительности, минимизации затрат энергии, удельного расхода топлива, воды, защитной атмосферы, минимизации вредных выбросов.

В доменной печи для контроля температуры используется более 50 ТТ, 7–9 ПИ, 10–15 ТС, в кислородном конвертере — 8 ТТ, 3 ПИ, 3 ТС, в ДСП — 6 ТТ, 4 ТС [7]. Но наибольшее число термопар применяется на станах горячей прокатки. На листовом стане, который обычно обслуживается 4–5 нагревательными печами, установлено 65–75 ТТ, 6 ПИ, 20 ТС. Много измерителей температуры эксплуатируется в цехах холодной прокатки. На каждой колпаковой печи установлено по 2–3 ТТ, но таких печей в стране более 1300 стендов. Также много термометров на протяжных печах агрегатов непрерывного отжига (АНО) стальной полосы и полосы из цветных металлов. В России работает более 80 таких агрегатов и практически на каждом в АСУТП включены 15–20 ТТ, 3–5 ПИ, 4–6 ТС. Значительное число ТТ используется в секционных, камерных, вращающихся печах и др. [5]. Практически можно сделать вывод о том, что в металлургии около 70 % средств измерения это ТТ, 20 % — ПИ и 10 % — ТС.

Температура металла в печи — это основа информации о процессе в агрегате, необходимой для обеспечения его эффективного функционирования, исследования, диагностики, а также для их дальнейшего совершенствования, т. е. проектирования аналогичных и принципиально новых агрегатов.

На рис. 3 приведена классификация методов контроля температуры металла в печах [7].

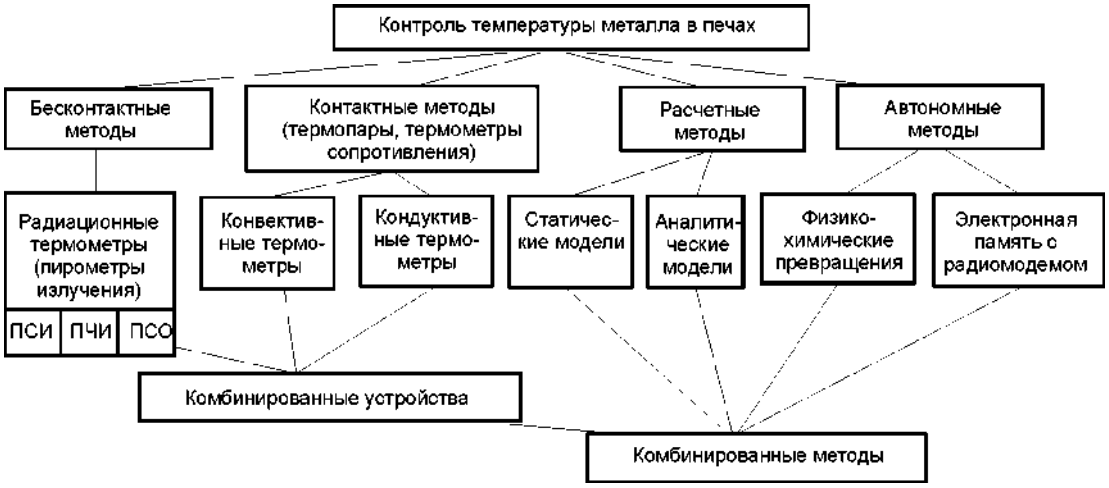


Рис. 3. *Классификация методов контроля температуры металла в печных агрегатах*

Fig. 3. *Classification of methods of metal temperature control in furnace facilities*

На кафедре “Теплофизика и экология металлургического производства”, в центре “ЭНЕРГОМЕТ”, на малом предприятии “Инновации и энергосбережение” и в лаборатории “Теплотехнические измерения в металлургии” НИТУ “МИСиС” выполнен значительный объем исследований промышленных нагревательных печей станов горячей прокатки, камерных, колпаковых и протяжных печей, которые позволили сделать вывод о том, что контроль температурных режимов нагрева и термообработки металла является исключительно важной задачей, но в то же время не обеспечивается в той мере, которая диктуется современными представлениями о качестве готовой продукции и затратами энергии на ее получение.

Остановимся на особенностях измерения температуры в нагревательных печах станов горячей прокатки и в протяжных печах АНО, как наиболее важных и особенно сложных для решения теплотехнических и технологических задач.

В нагревательных и термических печах (за очень редким исключением) температура металла практически не измеряется — управление процессом ведется по косвенному параметру — температуре зоны. Управление по одному зональному термометру (ЗТТ) не обеспечивает эффективной работы печи вследствие значительной протяженности зоны (длина 8–12 м, ширина 5–12 м, высота 2–2,5 м) и определяющего влияния на показания данного измерителя температуры кладки и омывающих газов, а не металла. Результаты исследований температурных режимов нагрева металла, выполненных совместно с ООО “Обнинская термоэлектрическая компания” на печах станов горячей прокатки России с годовым производством более 30 млн т [17], свидетельствуют о том, что показания ЗТТ значительно отличаются (за исключением томильной зоны) от действительной температуры металла, что приводит к перегреву (или недогреву) заготовок, интенсивному окалинообразованию, перерасходу топлива и снижению стойкости печи.

Для определения реального теплового состояния при нагреве массивного металла в нагревательных печах используют устройство автономного контроля температурного режима — автономный регистратор температуры (АРТ) (рис. 4), который позволяет определить реальное изменение температуры в различных точках заготовки (10–20 термопар) и газовой атмосферы над металлом по мере его продвижения через агрегат (рис. 5).

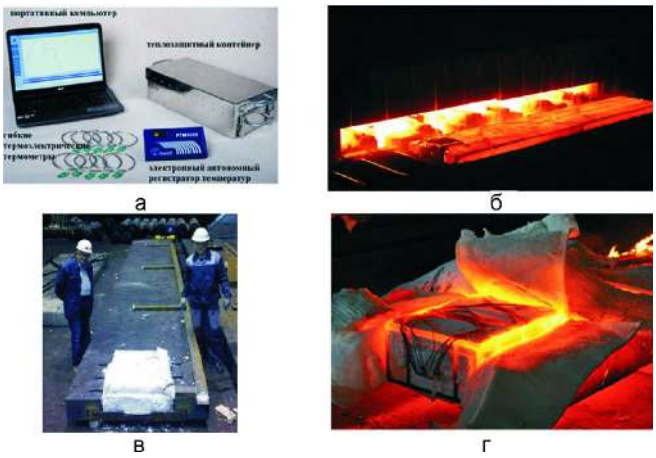


Рис. 4. *Автономный регистратор температуры фирмы Phoenix TM с теплозащитным контейнером: а — состав регистратора; б — выдача экспериментального сляба из печи; в — установка АРТ на экспериментальном слябе; г — начало распаковки тепловой защиты АРТ*

Fig. 4. *Phoenix TM autonomous detector of temperature (ADT) with heat protection container: а — content of the detector; б — discharge of experimental slab out of furnace; в — installation of the ADT at experimental slab; г — beginning of unpacking of ADT heat protection*

Рис. 5. *График изменения температуры в различных точках нагреваемого металла в печи стана горячей прокатки*

Fig. 5. *Diagram of temperature variation in various points of heated metal in a furnace of hot rolling mill*

Основная особенность АРТ фирмы Phoenix TM заключается в том, что его многоточечный регистратор проходит через печь и защищен от воздействия высоких температур высокоэффективным защитным контейнером, внутри которого температура регистратора не превышает 110 °С. Тепловая защита включает барьер-испаритель, заполненный водой, и наружную керамоволокнистую изоляцию, что обеспечивает его работоспособность до 10–12 ч при температуре 1250 °С. С помощью гибких кабельных термопар типа К (ХА) или N (НН), подключенных к регистратору и выведенных из контейнера к точкам контроля, производится измерение температуры экспериментального сляба. Память регистратора рассчитана на 130 тыс. измерений. Система Phoenix TM оснащена радиотелеметрическим устройством с высокотемпературной антенной, что позволяет оператору печи на экране компьютера наблюдать за нагревом металла в процессе его продвижения через печь в режиме реального времени и оперативно воздействовать на процесс нагрева. После выдачи экспериментального сляба из агрегата он переносится в зону охлаждения, где и производится распаковка защиты и снятие АРТ, затем регистратор извлекается из контейнера и подключается к компьютеру, в который производится выгрузка из его памяти всей полученной информации.

На рис. 5 приведен реальный график нагрева сляба перед листовым станом горячей прокатки в печи бельгийской фирмы. Пропуск АРТ обеспечивает оперативный персонал цеха значительным объемом информации. Как видно из рис. 5, 1-ая сварочная (нагревательная) зона работает неэффективно. Скорость нагрева металла в ней меньше, чем скорость в методической (неотапливаемой) зоне, что недопустимо и не позволяет использовать возможности печи. Верхняя часть томильной зоны не обеспечивает достижения задачи выравнивания температуры по сечению сляба. Температура металла падает до 1200 °С и ниже, несмотря на то что зональный термоэлектрический термометр (ЗТТ) фиксирует под сводом температуру 1250 °С. Как следует из кривых нагрева, температура металла в печи практически не соответствует показаниям ЗТТ — она естественно ниже и практически невозможно сказать, какая она фактически. Математическая модель не предоставляет нагревальщикам достоверную информацию. Превышение расчетных данных (см. рис. 5, квадратики) над измеренными АРТ значениями достигает 200 °С и выше. Причем в соответствии с математической моделью быстрее греется верхняя поверхность сляба, а на самом деле более интенсивно нагревается его нижняя поверхность. Также при выдаче металла из печи перепад температур по слябу существенно больше, чем декларировала фирма-поставщик.

В широких печах листовых станов (длина сляба превышает 11 м) может наблюдаться непонятная и невозможная ситуация: например, с левой стороны заготовки совершенно естественно сильнее нагрета верхняя поверхность, а хуже — нижняя, а с правой стороны наблюдается обратная картина — самую большую температуру имеет нижняя поверхность металла.

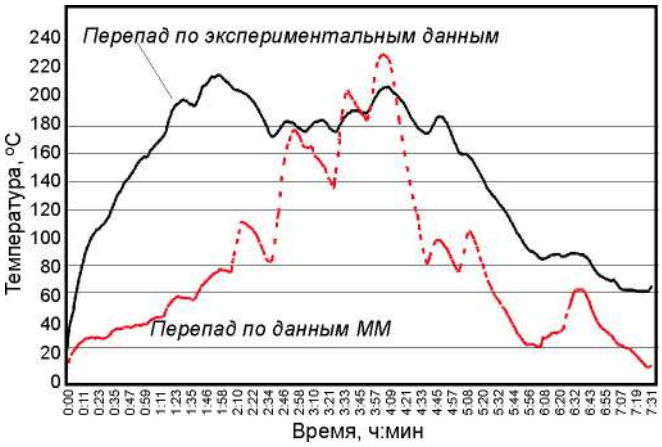


Рис. 6. *График сравнения реального изменения максимального перепада температуры по слябу в процессе нагрева сляба толщиной 315 мм с данными по математической модели*

Fig. 6. *Diagram of actual variation of maximum temperature drop along a slab in the process of 315 mm thickness slab heating comparing with data of a mathematical model*

Зарубежные поставщики печей практически не раскрывают состава математической модели для управления процессом нагрева. При этом проведенные эксперименты показали, что на

самом деле они не соответствуют сущности теплообменных процессов при нагреве массивного металла. На рис. 6 приведены расчетные и фактические данные об изменении максимального перепада температуры при нагреве заготовки толщиной 315 мм.

Приведенные кривые подтверждают тот факт, что разработчики математической модели не отдают себе отчет, что такие резкие изменения расчетных перепадов температуры по сечению невозможны в реальном процессе нагрева массивного металла в печи.

Использование АРТ при проведении направленного автоматизированного промышленного теплотехнического исследования позволило сократить на действующих агрегатах без их конструктивных изменений удельный расход топлива на 4–12 %, уменьшить разброс температуры по длине раската на 12,5 % [16].

На рис. 7 показано, что новый, разработанный на основании экспериментальных пропусков слябов с АРТ режим функционирования печи позволил существенно уменьшить максимальный перепад температуры по металлу — с 379 до 250 °С (кривая перепада № 3), при снижении удельного расхода топлива на 1 кг у.т. на 1 т нагреваемой стали.

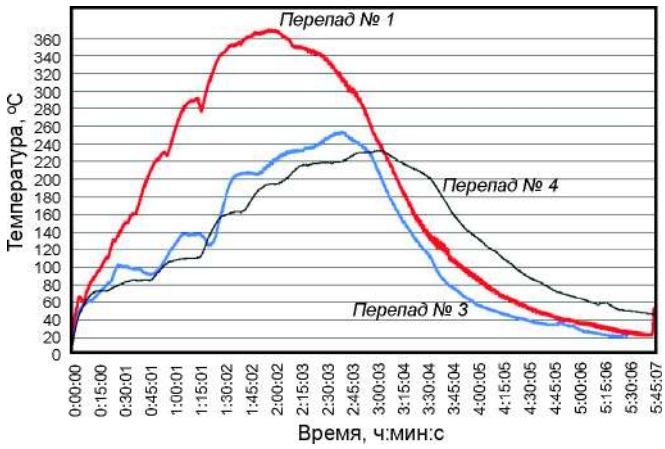


Рис. 7. *Изменение максимального температурного перепада по слябу: перепад 1 — старый режим; перепад 3 — новый внедренный усовершенствованный режим; перепад 4 — новый усовершенствованный режим с изменениями заказчика*

Fig. 7. *Variation of maximum temperature drop along a slab: drop 1 — old mode; drop 3 — new implemented perfected mode; drop 4 — new perfected mode with the customer changes*

Следует отметить, что практически во всех печах не обеспечивается необходимый температурный перепад на выдаче металла из печи: он составляет от 39 до 85 °С, хотя по технологической инструкции не должен превышать 20 °С. Также по ходу нагрева заготовок в печи имеется значительный перепад по сечению заготовок, что приводит к неоднородной структуре металла перед прокаткой.

Таким образом, управление агрегатом по показаниям ЗТТ — это опыт и искусство нагревальщиков, работающих в условиях неполной и недостаточно объективной информации. Как показали выполненные исследования, управление нагревательными печами затрудняется вследствие существенной неравномерности температурных полей в зонах печи как по высоте, так по ширине и длине. В ряде случаев по длине печи возникают непрерывно движущиеся волны изменяющейся температуры в рабочем пространстве, которые возникают из-за влияния зон друг на друга в процессе регулирования температуры в каждой из них. Этот процесс возникает также вследствие открывания и закрывания заслонок окон посада и выдачи металла. Кроме того, весьма хаотично производится посад металла в печь: теплый (200–400 °С) и горячий (до 700 °С) металл время от времени разделяется в печи холодными заготовками. Это приводит к необходимости “дергать” печь, непрерывно изменяя задания температуры в зонах, или к необходимости держать уровень температуры в зонах, ориентируясь на холодный металл, что приводит к перерасходу природного газа. Существенные возмущения в процессе управления температурным режимом агрегата вызывает изменяющийся режим прокатки на стане, в том числе плановые и внеплановые остановки, а также изменения темпа прокатки.

Необходимо вести управление процессом по температуре поверхности заготовок в печи с учетом показаний ПИ на стане. Однако при измерении температуры металла в печи с помощью ПИ возникают значительные погрешности, связанные с наличием фонового излучения от кладки, которое, отражаясь от заготовки в печи, дополнительно воспринимается ПИ. При этом действительную температуру металла можно определить только, если известно, какая часть излучения, полученного ПИ, относится непосредственно к металлу, а какая — к фону. Данная задача решается введением дополнительного датчика, функцией которого и является определение температуры фона. Таким образом, становится известной одна составляющая данной совокупности, что позволяет вычислить другую, например, с помощью формул, предложенных Н.Н. Киренковым [18], и определить действительную температуру металла. В качестве вспомогательного датчика может быть использован ТТ. Принципиальная схема двухсенсорной системы контроля температуры металла (ДСКТМ) приведена на рис. 8. Следует также отметить, что впервые аналогичная схема на нагреватель-

ной печи стана 2000 НЛМК была создана и реализована проф. М.Д. Климовицким в 1980 г. Для решения данной, исключительно важной задачи необходимо вести управление нагревом металла в печи по показаниям 3–4 ДСКТМ, устанавливаемых на входе в каждую из зон печи по ходу продвижения металла.

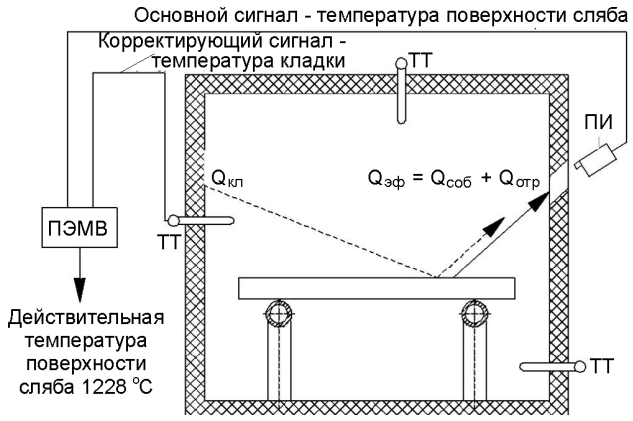


Рис. 8. *Схема двухсенсорной системы измерения действительной температуры металла в нагревательной печи: ТТ — термоэлектрический термометр; ПИ — пирометр излучения; $Q_{кл}$ — излучение кладки; $Q_{соб}$ — собственное излучение металла; $Q_{отр}$ — отраженное изучение от металла; $Q_{эфф}$ — эффективное излучение поверхности сляба*

Fig. 8. *Diagram of two-sensors' system of actual metal temperature measurement in heating furnace: TT — thermoelectric thermometer; ПИ — radiation pyrometer; $Q_{кл}$ — radiation of the lining; $Q_{соб}$ — metal intrinsic radiation; $Q_{отр}$ — radiation reflected from metal; $Q_{эфф}$ — effective radiation of the slab surface*

Аналогично для повышения эффективности функционирования протяжных печей АНО полосы были выполнены комплексные исследования их тепловой работы в цехах холодной прокатки НЛМК, ММК и "Северстали". В АНО ошибка измерения температуры полосы в печи с помощью ПИ может достигать 15–80 °С за счет неизвестной степени черноты и фонового излучения кладки. Впервые в отечественной практике разработаны методы и средства контроля действительной температуры металла, которые позволили усовершенствовать режимы отжига и конструкции башенных и горизонтальных протяжных печей. Разработаны и внедрены на башенных печах № 1 и 2 ЛПЦ-2 НЛМК комбинированные установки контроля температуры полосы на базе пирометра частичного излучения, градуируемого в печи с помощью контактного термоэлектрического термометра скользящего типа (рис. 9).

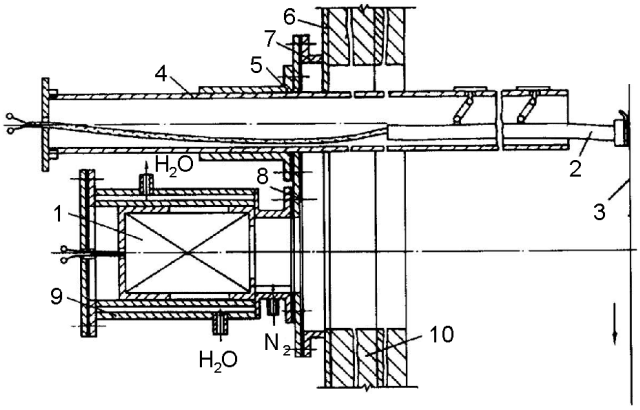


Рис. 9. *Установка для контроля температуры полосы в камере выдержки башенной печи [7]: 1 — пирометр частичного излучения с германиевым фотодиодом; 2 — штанга контактного термоэлектрического термометра (КТТ) со скользящим чувствительным элементом типа "лодочка"; 3 — полоса; 4 — корпус КТТ-2; 5 — направляющий и фиксирующий патрубок; 6 — кожух печи; 7 — патрубок с фланцем, привариваемый к кожуху печи; 8 — фланец; 9 — водоохлаждаемый корпус пирометра; 10 — кладка печи*

Fig. 9. *Facility of strip temperature control in exposure chamber of tower furnace [7]: 1 — partial radiation pyrometer with germanium photodiode; 2 — bar of contact thermoelectric thermometer (CTT) with sliding "boat" type sensor; 3 — strip; 4 — CTT-2 body; 5 — guiding and fixing pipe; 6 — furnace housing; 7 — pipe with flange welded to the furnace housing; 8 — flange; 9 — water-cooled pyrometer body; 10 — furnace lining*

Они установлены на входе в первую секцию камеры выдержки и включены в АСУТП "Отжиг", созданную Киевским институтом автоматики, и впервые в металлургической практике обеспечили управление обезуглероживающим отжигом трансформаторной стали по реальной температуре полосы. Комплекс исследований и внедрение АСУТП позволили повысить скорость транспортировки полосы в печи с 45 до 60 м/мин, сократить расход защитной атмосферы на 1000 м^3/ч, повысить качество металла и уменьшить затраты электроэнергии.

Для термической обработки автолистовой и конструкционной сталей на НЛМК применяется АНО башенного типа японской фирмы Nippon Kokan [7]. Печная часть агрегата (рис. 10) состоит из секций нагрева, выдержки, газоструйного охлаждения, ускоренного охлаждения (водяная ванна), повторного нагрева, перестаривания, быстрого охлаждения и воздушного охлаждения. В секциях нагрева и повторного нагрева установлены радиантные трубы, отапливаемые природным газом, в остальных секциях применяется электрический обогрев. Отжиг ведется в защитной атмосфере (95 % N_2 + 5 % H_2) при избыточном давлении 120–150 Па. В каждой секции имеется несколько зон тепловой мощности, управ-

ление которыми осуществляется по показаниям ЗТТ и контролируется с помощью ПИ, установленных на выходе из каждой секции печи.

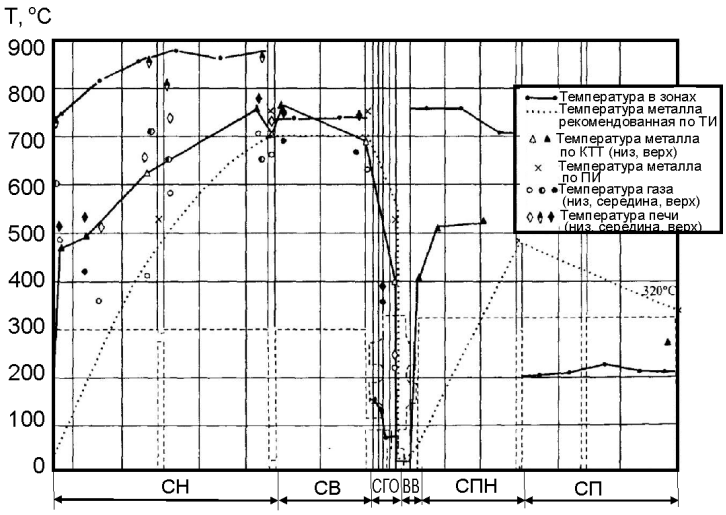


Рис. 10. *Температурный режим в агрегате непрерывного отжига автолистовой стали*

Fig. 10. *Temperature mode in continuous annealing line for automobile steel*

Транспортировка полосы в печной части осуществляется со скоростью до 220 м/мин; толщина обрабатываемой полосы 0,4–2,0 мм при ее ширине 900–1550 мм. Годовая производительность агрегата — 500 тыс. т. Процесс отжига в печи сложный и включает следующие операции: металл нагревают до 700–800 °С, выдерживают 1–2 мин при этой температуре и подстуживают защитным газом до 530–600 °С, затем следует резкое охлаждение в воде со скоростью более 1000 °С/с. В секции повторного нагрева металл вторично нагревают до 400–500 °С с последующей выдержкой при 450 °С в течение 2 мин в секции перестаривания, а затем охлаждают до 40 °С в двух секциях охлаждения.

В ходе автоматизированных экспериментов, проведенных совместно МИСиС и НЛМК с целью изучения и совершенствования тепловой работы агрегата, с интервалом в 2 мин с помощью ЦВМ на печать выводили текущее время, номера плавки и рулона, температуры зон (ЗТТ), температуры металла (ПИ), расходы природного газа и защитной атмосферы, толщину, ширину и скорость движения металла. Одновременно измеряли температуру движущейся полосы контактными термометрами, газа — просасывающим термометром конвективного типа, печи — термометром с открытым спаем. Результаты исследований представлены на рис. 10. Температурный режим отжига полосы значительно отклоняется от заданного технологической инструкцией. Имеет место перегрев полосы в первом проходе секции нагрева (до 300–480 °С вместо 100–150 °С), что отражалось на качестве термообработки и приводило к частым обрывам полосы в печной части АНО. Обнаружена значительная разность температуры металла по высоте печи (до 50–80 °С), обусловленная неравномерностью температуры газа и кладки по высоте и длине агрегата и несовершенством организации газового и теплового режимов. Перепад по температуре газа между средней и нижней частями печи в восьмом проходе секции нагрева достигает 300 °С, а по температуре печи — 200 °С. Показания штатных средств измерения не соответствуют действительным значениям температуры зон и полосы. Зональные термометры не дают объективной информации об имеющейся неравномерности температурных полей по длине зон. ПИ в секциях нагрева, выдержки и газоструйного охлаждения значительно завышают действительную температуру металла (на 30–100 °С), ПИ на выходе из третьей зоны секции нагрева занижает ее.

Усовершенствование температурного режима отжига за счет перераспределения нагрузки по зонам секции нагрева позволило снизить температуру в первом и пятом проходах с 390 и 685 °С до 270 и 485 °С соответственно (без изменения температуры полосы на выходе данной секции). Это позволило исключить порывы полосы в агрегате. В секции повторного нагрева также уменьшены тепловые нагрузки по зонам, что обеспечило снижение температуры металла до необходимых значений. Данные усовершенствования привели к существенному снижению удельного расхода природного газа — на 12–14 %.

Аналогичные исследования и совершенствование температурного отжига жести на башенной печи ММК позволили улучшить качество металла и снизить годовое потребление электроэнергии на 840 тыс. кВт·ч.

Приборостроительная промышленность страны не выпускает термометры для контроля температуры газовой атмосферы в печах. Их обычно изготавливают сами исследователи теплотехнических процессов. На рис. 11 изображено устройство для контроля температуры газов [3]. Керамические экраны-трубки исключают нагрев спая термопары излучением от кладки печи, имеющей более высокую температуру, чем измеряемый газ. Специальный эжектор обеспечивает скорость движения газа относительно спая термопары 60–150 м/с, расход ~500 см^3/с. Для увеличения срока службы несущая конструкция выполнена в виде водоохлаждаемого чехла.

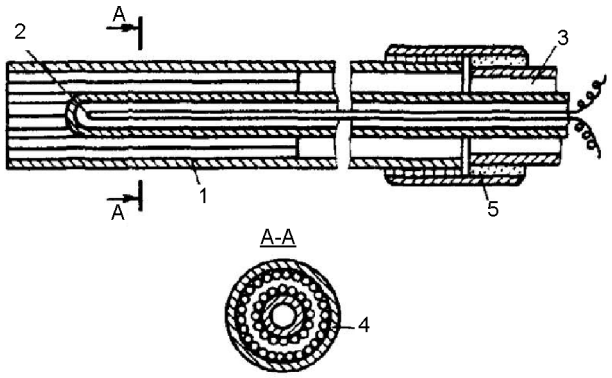


Рис. 11. *Схема конвективного термометра просасывающего типа для измерения температуры газа: 1 — огнеупорная трубка; 2 — спай термопары; 3 — к побудителю расхода (эжектору, насосу и т. п.); 4 — маленькие керамические трубки; 5 — несущая конструкция*

Fig. 11. *Diagram of convection thermometer of sucking type for gas temperature measurement: 1 — refractory pipe; 2 — thermocouple junction; 3 — to the consumption initiator (ejector, pump etc.); 4 — small ceramic pipes; 5 — supporting structure*

На рис. 12 представлена конструкция термометра для измерения температуры токсичной или взрывоопасной атмосферы без ее эвакуации из рабочего пространства печи, реализующая метод пульсирующей конвективной термометрии газа, разработанная в МИСиС [19]. С помощью сильфона *4* создается принудительное пульсирующее возвратно-поступательное движение газа относительно спая термопары *1*. Газ перемещается относительно спая термопары и нагревает его до температуры атмосферы в печи. Экраны *2* исключают нагрев спая за счет излучения кладки. Зазор между экраном и измерительным элементом и объем сильфона подобран так, чтобы обеспечить необходимый уровень конвективной теплоотдачи от газа к датчику температуры.

Данный прибор обеспечил достаточно точное измерение температуры газа на действующих печах АНО и позволил организовать правильную подачу защитного газа в камеры нагрева, выдержки и его эффективное движение в рабочем пространстве, что увеличило интенсивность процесса обезуглероживания трансформаторной стали в башенных печах.

Температуру кладки в печах измеряют редко, хотя значение контроля данного параметра при повышении требований к равномерности температур в рабочем пространстве агрегата возрастает. Обычно за величину, характеризующую температуру кладки, принимают температуру, измеряемую зональным ТТ, спай которого достаточно близок к внутренней поверхности кладки. Однако это даже не локальная характеристика данного параметра, а лишь точечная.

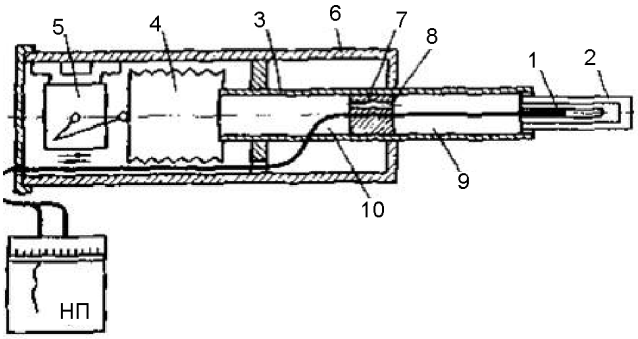


Рис. 12. *Принципиальная схема устройства конвективного термометра пульсирующего типа для измерения температуры газа: 1 — спай термопары; 2 — экранирующий элемент; 3 — труба; 4 — сильфон; 5 — привод; 6 — корпус; 7 — втулка; 8 — отверстие; 9 — рабочая полость; 10 — промежуточная полость; ИП — измерительный прибор*

Fig. 12. *Principal diagram of pulsing type convection thermometer design for gas temperature measurement: 1 — thermocouple junction; 2 — screening element; 3 — pipe; 4 — bellows; 5 — drive; 6 — body; 7 — bush; 8 — opening; 9 — working cavity; 10 — intermediate cavity; ИП — measuring device*

Промышленные эксперименты на нагревательных и термических печах НЛМК, ММК, “Северстали”, “Уральской стали”, Выксунского металлургического завода и других предприятий обеспечили существенное сокращение расхода топлива, защитной атмосферы и электроэнергии, позволили увеличить производительность агрегатов и повысить качество готовой продукции.

Правильно проведенное исследование позволяет определить виды необходимой измерительной аппаратуры и представительные места для установки термометров.

Необходимо оснащать сложные печные агрегаты постоянно действующими автоматизированными исследовательскими системами, работающими как в режиме “советчика мастера”, так и функционирующими внутри АСУТП агрегата, как это сейчас имеется на современных доменных печах. Лучшие агрегаты в черной металлургии являются практически полностью автоматическими, т. е. в системе управления реализована концепция “искусственного интеллекта”.

Измерение температуры в сложных металлургических печных агрегатах — это профессиональное искусство, базирующееся на глубоких знаниях из различных отраслей науки и техники и требующее всестороннего и тщательного изучения объекта, для которого создается вначале уникальный, а затем и широко используемый

инструмент контроля фактически самого важного параметра для эффективного функционирования черной металлургии и существования человеческой цивилизации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смородинский Я.А. Температура. — М.: Наука, 1981. — 180 с.
2. Температурные измерения / О.А. Геращенко, А.Н. Гордов, А.К. Еремина и др.; под ред. О.А. Геращенко. — Киев: Наукова думка, 1989. — 704 с.
3. Метрология и теплотехнические измерения: учебник / А.М. Беленький, А.Н. Бурсин, В.В. Курносов и др.; под. ред. А.М. Беленького. — М.: Изд. дом НИТУ “МИСиС”, 2019. — 396 с.
4. Свет Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур. — М.: Наука, 1982. — 296 с.
5. Сталь на рубеже столетий / Л.Н. Белянчиков, Д.И. Бородин, В.С. Валавин и др.; под научн. ред. Ю.С. Карабасова. — М.: МИСиС, 2001. — 664 с.
6. Адно Ю.Л. Мировой рынок металлургического оборудования: основные тенденции // Черные металлы. 2019. № 9. С. 69–76.
7. Измерение температур: теория, практика, эксперимент. Т. 2. Измерение температуры в промышленности и энергетике / А.М. Беленький, М.Ю. Дубинский, М.Г. Ладыгичев и др.; под ред. А.М. Беленького, В.Г. Лисиенко. — М.: Теплотехник, 2007. — 736 с.
8. Измерение температуры: теория, практика, эксперимент. В 3 кн. / В.Г. Лисиенко, Е.М. Шлеймович, М.Г. Ладыгичев и др.; под ред. В.Г. Лисиенко. — М.: Теплотехник, 2009. Кн. 1. — 549 с. Кн. 2. — 339 с. Кн. 3. — 537 с.
9. Серов Ю.В. Метрологическое обеспечение процессов черной металлургии (метрология и информатика): справочник. В 2 кн. — М.: Металлургия, 1983. Кн. 1 — 272 с. Кн. 2 — 352 с.
10. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы: учебник. — М.: Энергия, 1978. — 701 с.
11. Блинов О.М., Беленький А.М. Измерение и контроль в черной металлургии. Т. 6. Итоги науки и техники. Металлургическая теплотехника. — М.: ВИНИТИ, 1982. С. 3–50.
12. Гордов А.Н., Жагулло О.М., Иванова А.Г. Основы температурных измерений. — М.: Энергоатомиздат, 1992. — 304 с.
13. Линевег Ф. Измерение температур в технике. — М.: Металлургия, 1980. — 544 с.
14. Лысиков Б.В., Прозоров В.К. Реакторная термометрия. — М.: Атомиздат, 1980. — 200 с.
15. Зайцев П.А., Олейников П.П., Приймак С.В., Таубин М.Л. Средства температурного контроля ядерных энергетических установок. — Подольск, 2018. — 226 с.
16. Улановский А.А., Гончарук Т.Ю. Исследование стабильности термопар ВР5/20 с положительным электродом, легированным 0,05 % наночастиц оксида иттрия // 5-я Всероссийская и стран участниц КООМЕТ конференция по проблемам термометрии “Температура 2015”, Санкт-Петербург, ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 2015. Тезисы. С. 171–174.
17. Улановский А.А., Тааке М., Беленький А.М. и др. Использование автономной автоматизированной системы компании Phoenix TM для мониторинга температурного поля нагреваемого металла в металлургических печах // Черные металлы. 2019. № 9. С. 54–60.
18. Киренков И.Н. Влияние отраженного света на показания пирометров излучения // Труды метрологических институтов СССР. — Л.: 1969. № 105 (165). С. 221–229.
19. А.с. 1012047 СССР, МПК С 21 D 11/00. Способ измерения температуры газа и устройство для его реализации / А.М. Беленький, О.М. Блинов, А.Е. Булгаков, В.Ф. Каширских // Заявл. 28.12.1983; опубл. 15.04.1983. Бюл. № 14.

Поступила 17 января 2021 г.

REFERENCES

1. Smorodinskii Ya.A. *Temperatura* [Temperature]. Moscow: Nauka, 1981, 180 p. (In Russ.).
2. Gerashchenko O.A., Gordov A.N., Eremina A.K. etc. *Temperaturnye izmereniya* [Temperature measurements]. Gerashchenko O.A. ed. Kiev: Naukova dumka, 1989, 704 p (In Russ.).
3. Belen’kii A.M., Bursin A.N., Kurnosov V.V., Chibizova S.I., Shatokhin K.S. *Metrologiya i teplotekhnicheskie izmereniya* [Metrology and heat engineering measurements]. Belen’kii A.M. ed. Moscow: Izd. dom NITU “MISiS”, 2019, 396 p. (In Russ.).
4. Svet D.Ya. *Opticheskie metody izmereniya istinnykh temperatur* [Optical methods of actual temperatures measurement]. Moscow: Nauka, 1982, 296 p. (In Russ.).
5. Belyanchikov L.N., Borodin D.I., Valavin V.S. etc. *Stal’ na rubezhe stoletii* [Steel at the turn of the century]. Karabasov Yu.S. ed. Moscow: MISiS, 2001, 664 p (In Russ.).
6. Adno Yu.L. World market of metallurgical equipment: basic tendencies. *Chernye metally*, 2019, no. 9, pp. 69–76. (In Russ.).
7. Belen’kii A.M., Dubinskii M.Yu., Ladygichev M.G., Lisienko V.G., Shchelokov Ya.M. *Izmerenie temperatur: teoriya, praktika, eksperiment. T. 2. Izmerenie temperatury v promyshlennosti i energetike* [Measuring of temperatures: theory, practice, experiment. Vol. 2. Temperature measurement in industry and energy sector]. Belen’kii A.M., Lisienko V.G. ed. Moscow: Teplotekhnik, 2007, 736 p. (In Russ.).

8. Lisienko V.G., Shleimovich E.M., Ladygichev M.G. etc. *Izmerenie temperatury: teoriya, praktika, eksperiment. V 3 kn.* [Measuring of temperature: theory, practice, experiment. In 3 books]. Lisienko V.G. ed. Moscow: Teplotekhnik, 2009, Kn. 1 — 549 p., Kn. 2 — 339 p., Kn. 3 — 537 p. (In Russ.).
9. Serov Yu.V. *Metrologicheskoe obespechenie protsessov chernoi metallurgii (metrologiya i informatika). V 2 kn.* [Metrology support of processes of steel industry (metrology and informatics) in 2 books]. Moscow: Metallurgiya, 1983, Kn. 1 — 272 p., Kn. 2 — 352 p. (In Russ.).
10. Preobrazhenskii V.P. *Teplotekhnicheskie izmereniya i pribory* [Heat engineering measurements and devices]. Moscow: Energiya, 1978, 701 p. (In Russ.).
11. Blinov O.M., Belen'kii A.M. *Izmerenie i kontrol' v chernoi metallurgii* [Measurements and control in steel industry]. *Itogi nauki i tekhniki. Metallurgicheskaya teplotekhnika. T. 6* [Results of science and technics. Metallurgical heat engineering Vol. 6]. Moscow: VINITI, 1982, pp. 3–50. (In Russ.).
12. Gordov A.N., Zhagullo O.M., Ivanova A.G. *Osnovy temperaturnykh izmerenii* [Fundamentals of temperature measurements]. Moscow: Energoatomizdat, 1992, 304 p. (In Russ.).
13. Lineveg F. *Izmerenie temperatur v tekhnike* [Temperature measurement in technics]. Moscow: Metallurgiya, 1980, 544 p. (In Russ.).
14. Lysikov B.V., Prozorov V.K. *Reaktornaya termometriya* [Reactor thermometry]. Moscow: Atomizdat, 1980, 200 p. (In Russ.).
15. Zaitsev P.A., Oleinikov P.P., Priimak S.V., Taubin M.L. *Sredstva temperaturnogo kontrolya yadernykh energeticheskikh ustanovok* [Means of temperature control in nuclear energy facilities]. Podol'sk: 2018, 226 p. (In Russ.).
16. Ulanovskii A.A., Goncharuk T.Yu. *Issledovanie stabil'nosti termopar VR5/20 s polozhitel'nym elektrodom, legirovannym 0,05 % nanochastits oksida ittriya* [Study of stability of BP5/20 thermocouples with positive electrode, alloyed by 0.05% of yttrium oxide nanoparticles]. *5-ya Vserossiiskaya i stran uchastnits KOOMET konferentsiya po problemam termometrii "Temperatura 2015", Sankt-Peterburg, VNIIM im. D.I. Mendeleeva, 2015. Tezisy* [The 5th All-Russia and KOOMET participants countries conference on problems of thermometry "Temperature 2015", Sankt-Petersburg, VNIIM after D.I. Mendeleev, 2015. Thesis]. pp. 171–174. (In Russ.).
17. Ulanovskii A.A., Taake M., Belen'kii A.M., Bursin A.N., Chibizova S.I. Application of autonomous automated system Phoenix TM for monitoring temperature field of heated metal in metallurgical furnaces. *Chernye metally,* 2019, no. 9, pp. 54–60. (In Russ.).
18. Kirenkov I.N. *Vliyanie otrazhennogo sveta na pokazaniya pirometrov izlucheniya* [Effect of reflected light on indications of radiation pyrometers]. *Trudy metrologicheskikh institutov SSSR* [Trans. of metrology institutes of USSR]. Leningrad: 1969, no. 105 (165), pp. 221–229. (In Russ.).
19. Belen'kii A.M., Blinov O.M., Bulgakov A.E., Kashirskikh V.F. *Sposob izmereniya temperatury gaza i ustroistvo dlya ego realizatsii* [A method of gas temperature measuring and facility for its realization]. A.S. USSR no. 1012047. IPC C 21 D 11/00. *Byulleten' izobretenii*, 1983, no. 14. (In Russ.).

Received January 17, 2021