

На правах рукописи



Хабаров Виталий Александрович

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ ТЕПЛОВЫХ
НАГРУЗОК ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ**

05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов
и изделий

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2010

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск

Научный руководитель кандидат технических наук,
доцент
Непомнящий Олег Владимирович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор
Ченцов Сергей Васильевич

кандидат технических наук,
доцент
Ушанов Сергей Викторович

Ведущая организация Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева»

Защита состоится «15» декабря 2010 года в 16:00 часов на заседании диссертационного совета ДМ 212.099.05 при Сибирском федеральном университете по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. академика Киренского, 26, ауд. УЛК-115.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Сибирского федерального университета по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. академика Киренского, 26.

Автореферат разослан «15» ноября 2010 года.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета,
доктор технических наук



Легалов А. И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

В современных условиях быстро растущего производства особое внимание уделяют активно развивающимся методам и средствам контроля производственных процессов.

Наиболее актуальными являются решения задач управления технологическими процессами, происходящими в тяжелых промышленных условиях. К таким производствам следует отнести: радиационно опасные производства, химически опасные производства, производства применяющие опасные транспортные средства и опасные технически сооружения, производства при высоких и сверхвысоких температурах. К последним относятся практически все направления в металлургии, производственные процессы, использующие обжиговые технологии (производства кирпича и керамических изделий), процессы производства пластмасс и полиэтилена высокого давления и др.

В данном случае температура производственного процесса и ее распределение по технологической полости является одним из основных факторов, влияющих на получения конечных изделий. В большинстве случаев необходимо измерять температуру в рабочей области [1]. Например, в полости обжиговой печи, пресс-формы, ванне электролизера и т.д. Необходимо получить трехмерное распределение температуры в означенном объеме, которое служит основанием для контроля температурного поля данного процесса.

Вопросам решения задачи распределения температурных полей посвящены работы Быкова В.И., Шайдурова Г.Я., Громько А.И., Шокина Ю.И., Добронца Б.С., Злобина В.С., Lovell M.R., Dutta S., Morehouse J. H., Zhaowen Wang, Guanghua Chen, Wenju Tao и др. Тем не менее, известные работы не содержат готовых методик аппаратного восстановления температурного поля при высоких и сверхвысоких температурах в тяжелых промышленных условиях, позволяющих выполнить построение трехмерной модели температурного поля, на основании которой осуществляется контроль распределения температуры по технологической полости.

Результатом решения данной задачи является в первую очередь повышение качества изделий и сплавов, уменьшение процента брака, увеличение срока службы и отказоустойчивости оборудования, и как следствие возможность перехода на качественно новый уровень производства. Например, получение алюминия высокой чистоты, выплавка новых сплавов, разработка новых технологий обжига, что ведет к расширению ассортимента и повышению качества выпускаемой продукции.

Перечисленные факторы определяют актуальность разработки, как методов, так и новых средств (вычислительных систем) контроля высокотемпературных производственных процессов, основанных на

моделировании трехмерного распределения температурных полей в рабочей зоне.

Решение данной задачи в области высоких температур не является единственным приложением и может применяться в более низком температурном диапазоне.

Целью данной работы является разработка метода и аппаратно-программного комплекса (АПК) контроля тепловых нагрузок, при высокотемпературных производственных процессах, с целью повышения качества выпускаемой продукции, увеличения срока службы и отказоустойчивости оборудования в широком спектре применений.

Объект исследования – приборы и методы контроля температурных характеристик технологического оборудования, используемого для получения изделий и материалов при высоких и сверхвысоких температурах.

Предмет исследования – точностные характеристики приборов и методов контроля температурных полей технологического оборудования высокотемпературных производственных процессов.

Задачи исследования:

1. Выполнить анализ технических особенностей аппаратуры, современных методов и способов автоматизированного контроля температурных полей и факторов влияющих на повышение качества выпускаемой продукции, надежность и эффективность технологического оборудования.

2. Разработать метод восстановления температурного поля в трехмерной системе координат, зависимый по времени, увеличивающий точность и оперативность получаемой информации о состоянии распределения температуры в замкнутом пространстве технологической полости.

3. Разработать алгоритмы программной фильтрации и обработки информативных сигналов, а так же программы представления трехмерной визуализированной модели температурного поля на основании предложенного метода.

4. Разработать АПК для получения данных о температуре в заданных точках объекта, их обработки и анализа, построения визуализированной трехмерной модели температурного поля, провести его испытание в лабораторных и промышленных условиях, а так же выполнить экспериментальное внедрение АПК на производство.

Методы исследования. Поставленные задачи решены современными методами вычислительной математики с использованием методов аппроксимации функций, теории тепловых полей, математической статистики, методов электротехники и теплотехники. При разработке программного обеспечения и прикладных библиотек использовались средства САПР LabVIEW, GueniDAQ и другие, а также языки программирования C# и AVR Assembler.

Результаты, выносимые на защиту:

1. Аппаратно-программный комплекс сбора данных, моделирования и контроля температурных полей.

2. Алгоритмы и программы обработки информативных сигналов, позволяющие выполнить программную фильтрацию исходных данных и построить изображение температурного поля для контроля распределения температуры в технологической полости.

3. Способ расположения температурных датчиков, основанный на решении комплекса предложенных уравнений, позволяющий повысить точность получаемой информации о распределении температурного поля.

4. Метод контроля температурного поля, основанный на предложенных базисных функциях, позволяющий, с высокой точностью, определить значение температуры в любой точке исследуемого пространства.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Предложен алгоритм обработки информативных сигналов, позволяющий снизить уровень помех в исходных данных и в результате получить более точную и достоверную информацию о распределении температурного поля.

2. Предложен набор базисных функций метода наименьших квадратов для восстановления температурного поля, основанный на использовании как полиномиальных, так и экспоненциальных зависимостей, позволяющий определить количество и способ расположения температурных датчиков в технологической полости с целью повышения точности и оперативности получаемой информации о распределении температурного поля.

3. Предложен метод контроля тепловых нагрузок, основанный на предложенных алгоритмах фильтрации сигнала и способе расположения датчиков в исследуемом пространстве позволяющий осуществить мониторинг распределения температуры в технологической полости.

Значения для теории. Исследован метод восстановления температурного поля, учитывающий распределение температуры в трехмерном пространстве и зависимый по времени. Оценена погрешность данного метода.

Практическое значение работы заключается в следующем:

1. Разработана аппаратура комплекса сбора данных, моделирования и контроля температурных полей для использования в тяжелых промышленных условиях при высоких и сверхвысоких температурах.

2. Разработан программный комплекс «Программа автоматизированного контроля тепловых нагрузок высокотемпературных производственных процессов».

3. Разработано программное обеспечение и библиотеки низкого уровня для микропроцессорной аппаратуры управления комплексом.

4. Разработан и внедрен в учебный процесс ИКИТ СФУ учебный комплекс дисциплины «Проектирование систем автоматизации технологических процессов» в том числе учебные пособия, лекционный и практический материал, а так же новое лабораторное оборудование,

используемые студентами, аспирантами и специалистами в области температурного анализа.

Достоверность полученных результатов, защищенная приоритетом авторских публикаций, подтверждается удовлетворительным совпадением результатов, полученных с помощью разработанного АПК, с данными, полученными при использовании промышленного калиброванного сертифицированного термометра, при лабораторных и промышленных испытаниях АПК с различными материалами и способами нагрева.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих конференциях:

1. III Всероссийская научно-техническая конференция «Молодежь и наука: начало XXI века», (г. Красноярск, 2007 г.).
2. XXVII Российская школа, (г. Екатеринбург, 2007 г.).
3. VI Международная научно-техническая конференция «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации», (г. Курск, 2008 г.).
4. XII Международная научно-практическая конференция «Современные технологии в машиностроении», (г. Пенза, 2008 г.).
5. VII Всероссийская научно-практическая конференция «Молодежь и современные информационные технологии», (г. Томск, 2009 г.).

Использование результатов работы. Результаты исследований диссертационной работы используются для получения данных о состоянии распределения температурного поля в алюминиевых слитках, полученных методом непрерывного литья на металлургическом производстве ООО «Красноярский металлургический завод».

Результаты работы использовались при моделировании и измерении параметров обжига, пуска и послепускового периода алюминиевого электролизера для разработки схемы установки термопар в футеровке катодного устройства электролизера и измерения его температурного поля на ОАО «РУСАЛ Красноярский алюминиевый завод».

Результаты работы внедрены в учебном процессе ФГАОУ ВПО «Сибирский Федеральный Университет» для обучения студентов специальности 230100 «Вычислительная техника» и используются при чтении лекций, проведении практических занятий, выполнении курсовых работ и дипломных проектов. Использование результатов диссертационной работы подтверждено соответствующими актами.

Публикации. По результатам проведенных исследований и выполненных работ опубликовано 16 печатных работ, в том числе 3 работы из списка изданий, рекомендованных ВАК. Материалы диссертационной работы использовались при подготовке 3-х опубликованных учебных пособий.

Осуществлена регистрация программного обеспечения АПК в реестре программ для ЭВМ Российской Федерации (свидетельство о регистрации №2009617139 от 24.12.2009).

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения, выполнена на 150 страницах, содержит 81 рисунок, 12 таблиц, список используемых источников из 75 наименований и приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, указаны цель и задачи исследования, научная новизна, практическая ценность и реализация результатов работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, отражены вопросы апробации и достоверности полученных результатов.

В первой главе диссертационной работы изложены результаты анализа предметной области, на основании которых отмечено, что для производств, связанных с высокими температурами, необходим контроль температурного режима, нарушение которого может привести к необратимым последствиям в технологическом процессе.

Одной из особенностей в таких производствах является сложность измерения температурных параметров контролируемого объекта, связанная как с конструктивными особенностями, так и с окружающей средой, которая может быть достаточно агрессивной (магнитные и электрические поля, различные виды производственных помех, загрязнения и пр.).

Рассмотрены высокотемпературные производственные процессы, где применение разрабатываемого прибора принесло бы наибольший экономический эффект.

Например при производстве кирпича, а именно при его обжиге, который заключается в постепенном и непрерывном нагревании сырца до установленной температуры (обычно до 920 – 980 °С), после чего изделия также постепенно охлаждаются. Условия обжига, т. е. скорость повышения и последующего понижения температуры, являются наиболее важным и ответственным процессом производства. При несоответствии распределения температурного поля заданному технологическому процессу, происходит перерасход топлива, повышается процент брака и др.

Еще одним наглядным примером является производство алюминия. При производстве алюминия способом электролиза криолитоглиноземных расплавов, весомый экономический эффект, достигается при продлении срока службы электролизера, в значительной степени зависящий от способа предстартового обжига, метода пуска и качества эксплуатации электролизера.

Катодное устройство электролизера состоит из катодного кожуха, углеродной, огнеупорной и теплоизоляционной футеровок. Предпусковой обжиг необходим для нагрева углеродистой футеровки до температуры, близкой к эксплуатационной. Перегрев приводит к накоплению повреждений в углеродистой футеровке, вызывает начальную деформацию, что способствует ее дальнейшему разрушению при пуске и эксплуатации. Выбор оптимальных режимов обжига позволяет добиться практически равномерного прогрева

подины [6, 7]. В данной ситуации, результатом решения задачи равномерного распределения тепловой нагрузки будет в первую очередь увеличение срока службы и отказоустойчивости оборудования, повышение качества изделий и сплавов.

На основании проведенных исследований, изложенных в главе 1, следует отметить:

1. Предполагаемое решение научно-технической задачи контроля высокотемпературного процесса найдет широкий спектр применения в различных областях промышленности, практически при любом технологическом процессе, использующим высокотемпературный режим производства. Более того область высоких температур не является единственным направлением применения решаемой задачи, а найдет применение и в области низких и умеренных температур.

2. Решение задачи контроля температурного поля позволит избежать перерасходов энергетических ресурсов, повысит качество выпускаемой продукции и срок службы оборудования, снизит процент брака и др.

3. Существующие подходы к решению поставленной задачи не обладают требуемой на современном этапе развития точностью и оперативностью контроля технологического процесса.

4. С целью разработки аппаратуры управления высокотемпературным процессом требуется разработка метода восстановления температурного поля, для получения достоверной информации о состоянии температуры в любой точке исследуемого пространства.

5. При разработке метода восстановления температурного поля следует использовать трехмерное представление, которое позволит получить более точную информацию о распределении температуры в контролируемой области.

Во второй главе диссертационной работы изложены различные способы интерполяции функции, которые можно использовать для восстановления температурного поля. Для повышения точности восстановления температурного поля предложен набор базисных функций метода наименьших квадратов.

Пусть имеются известные значения экспериментальных данных в узловых точках $f(x_i, y_i, z_i, t_i) = f_i$. Введем непрерывную функцию $\varphi(x, y, z, t)$ для аппроксимации дискретной зависимости $f(x_i, y_i, z_i, t_i)$. В узлах функции $f(x, y, z, t)$ и $\varphi(x, y, z, t)$ будут отличаться на величину $\varepsilon_i = \varphi(x_i, y_i, z_i, t_i) - f(x_i, y_i, z_i, t_i)$. Отклонения ε_i могут принимать положительные и отрицательные значения. Чтобы не учитывать знаки, возведем каждое отклонение в квадрат и просуммируем квадраты отклонений по всем узлам

$$Q = \sum_{i=0}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=0}^n [\varphi(x_i, y_i, z_i, t_i) - f(x_i, y_i, z_i, t_i)]^2. \quad (1)$$

Метод построения аппроксимирующей функции $\varphi(x, y, z, t)$ из условия минимума величины Q рассматривается как метод наименьших квадратов. Наиболее распространен способ выбора функции $\varphi(x, y, z, t)$ в виде линейной комбинации.

$$\varphi(x, y, z, t) = c_0\varphi_0(x, y, z, t) + c_1\varphi_1(x, y, z, t) + \dots + c_m\varphi_m(x, y, z, t), \quad (2)$$

где $\varphi_0(x, y, z, t), \varphi_1(x, y, z, t), \dots, \varphi_m(x, y, z, t)$ – базисные функции, $m \leq n$; c_0, c_1, \dots, c_m – коэффициенты, определяемые при минимизации величины Q .

Выбор набора и количества базисных функций и соответственно коэффициентов влияет на точность и достоверность восстановления температурного поля. При выборе, традиционно, руководствуются следующим условием: если известна экспериментальная (исходная) погрешность данных – σ , то выбор числа коэффициентов, определяется условием $\sqrt{Q} \approx \sigma$, и если $\sqrt{Q} \gg \sigma$, число коэффициентов аппроксимации недостаточно для правильного воспроизведения графика экспериментальной зависимости. Если $\sqrt{Q} \ll \sigma$, многие коэффициенты в (2) не будут иметь физического смысла. В исследовании температурного поля физического объекта при высоких температурах достаточно сложно определить исходную погрешность данных. Следовательно, необходимо экспериментально определить необходимый и достаточный набор базисных функций.

Максимальное количество базисных функций определяется исходя из количества источников исходных данных – температурных датчиков, которые обычно располагают в вершинах измеряемого объекта, рисунок 1(слева).

В данном случае максимальное количество базисных функций не должно превышать 16, тогда в качестве аппроксимирующей функции можно использовать известное уравнение, состоящее из 11 базисных функций:

$$\varphi(x, y, z, t) = c_0 + c_1x + c_2y + c_3z + c_4t + c_5xy + c_6xz + c_7xt + c_8yz + c_9yt + c_{10}zt \quad (3)$$

или дополненное уравнение (3) комбинациями переменных, увеличив количество базисных функций до 16:

$$\varphi(x, y, z, t) = c_0 + c_1x + c_2y + c_3z + c_4t + c_5xy + c_6xz + c_7xt + c_8yz + c_9yt + c_{10}zt + c_{11}xyt + c_{12}xzt + c_{13}yzt + c_{14}xyz + c_{15}xyzt \quad (4)$$

Уравнение (4) содержит уже максимально возможное количество базисных функций для данного варианта набора и размещения информативных сигналов. Вследствие чего, предложено увеличить количество температурных датчиков вдвое и расположить их так, как показано на рисунке 1(справа).

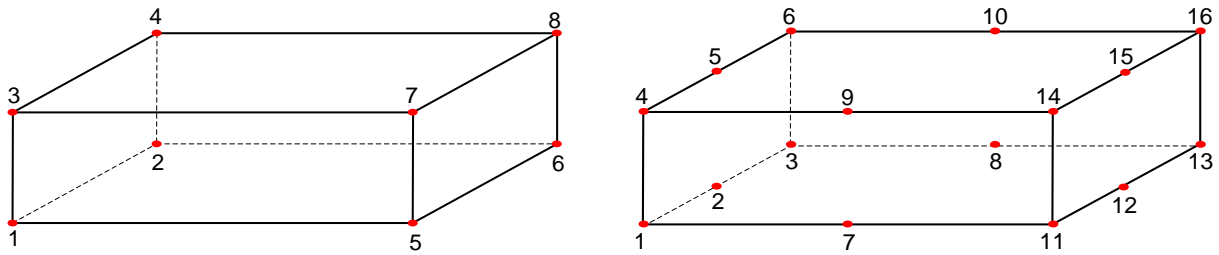


Рисунок 1 – Расположение температурных датчиков, слева – обычное расположение, справа – предложенное расположение

В данном случае максимальное количество базисных функций увеличивается до 32 и как следствие увеличивается точность восстановления температурного поля. Таким образом, в качестве аппроксимирующей функции предложено использовать дополненное уравнение (4) вторыми и третьими степенями переменных и их комбинациями:

$$\begin{aligned} \varphi(x, y, z, t) = & c_0 + c_1x + c_2y + c_3z + c_4t + c_5xy + c_6xz + \\ & c_7xt + c_8yz + c_9yt + c_{10}zt + c_{11}xyt + c_{12}xzt + c_{13}yzt + \\ & c_{14}xyz + c_{15}xyzt + c_{16}x^2 + c_{17}y^2 + c_{18}z^2 + c_{19}x^2y + \\ & c_{20}x^2z + c_{21}x^2t + c_{22}y^2x + c_{23}y^2z + c_{24}y^2t + c_{25}x^3 + \\ & c_{26}y^3 + c_{27}z^3 + c_{28}x^3t + c_{29}y^3t + c_{30}z^3t \end{aligned} \quad (5)$$

Для восстановления температурных полей, где заранее известно или предполагается, что температурное поле будет иметь резкие перепады температуры предлагается в качестве аппроксимирующей функции использовать дополненное уравнение (4) вторыми степенями переменных и их комбинациями, а так же экспоненциальными зависимостями переменных:

$$\begin{aligned} \varphi(x, y, z, t) = & c_0 + c_1x + c_2y + c_3z + c_4t + c_5xy + c_6xz + \\ & c_7xt + c_8yz + c_9yt + c_{10}zt + c_{11}xyt + c_{12}xzt + c_{13}yzt + \\ & c_{14}xyz + c_{15}xyzt + c_{16}x^2 + c_{17}y^2 + c_{18}z^2 + c_{19}x^2y + \\ & c_{20}x^2z + c_{21}x^2t + c_{22}y^2x + c_{23}y^2z + c_{24}y^2t + c_{25}e^{-ax} + \\ & c_{26}e^{-ay} + c_{27}e^{-az} + c_{28}e^{-axt} + c_{29}e^{-ayt} + c_{30}e^{-azt} \end{aligned} \quad (6)$$

Восстановление температурного поля происходит интервально, в каждый интервал времени происходит перерасчет коэффициентов, используемой аппроксимирующей функции, основанный на предыдущем состоянии распределения температуры и полученных новых данных.

Для установления точности приведенных аппроксимирующих функций (3-6) проведем их проверку на наборе значений температуры прямоугольного объекта, полученных в точках, расположенных в соответствии с рисунком 1(справа). Значения температуры известны для нескольких временных интервалов. Данные значения являются узловыми и принимаются за эталонные.

В результате проведенных исследований выяснилось, что при использовании в качестве аппроксимирующих функций уравнения (3, 4) средние отклонения значений от эталонных составляют 2,6%, а для уравнений (5, 6) – 0.01%.

Однако, при реальных измерениях в исходных данных содержится некоторая погрешность. На основании этого были проведены исследования по восстановлению исходной функции, когда в исходных данных присутствует случайная ошибка порядка 7-10%. Средние отклонения восстановленных значений от эталонных, для данных случаев и случая когда данные были без искажений, сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Отклонение восстановленных значений от эталонных

Метод восстановления	Среднее отклонение, %			
	Без искажений	Искажено 25% сигналов	Искажено 50% сигналов	Искажено 100% сигналов
Полиномиальная	0.01	3.2	4.7	7.8
МНК с уравнением (3)	2.6	2.6	3.0	3.6
МНК с уравнением (4)	2.6	2.6	2.7	2.8
МНК с уравнением (5)	0.01	0.4	0.5	1.2
МНК с уравнением (6)	0.01	0.4	0.5	1.2

На основании результатов исследований, изложенных в главе 2, следует отметить:

1. Из рассмотренных способов интерполяции функций для восстановления температурного поля выделен метод наименьших квадратов, поскольку именно этот метод позволяет получить данные с максимальной точностью при высокой погрешности измерения.

2. Для восстановления исходной функции предложено применять означенный метод, использующий в качестве аппроксимирующей функции предложенные уравнения (5,6), так как в этих случаях отклонения от исходной функции будут минимальны.

3. На основании полученного метода предложен способ расположения датчиков, позволяющий повысить точность получаемой информации о распределении температурного поля.

4. Применение предложенного метода для восстановления температурного поля подходит для простых по форме и однородных по составу объектов. Так же в нем не учитываются теплофизические свойства материалов, которые могли бы уменьшить влияние шума в исходных данных на результат, однако для решения большинства задач по оперативному контролю использование предложенного метода является достаточным и дает удовлетворительный результат.

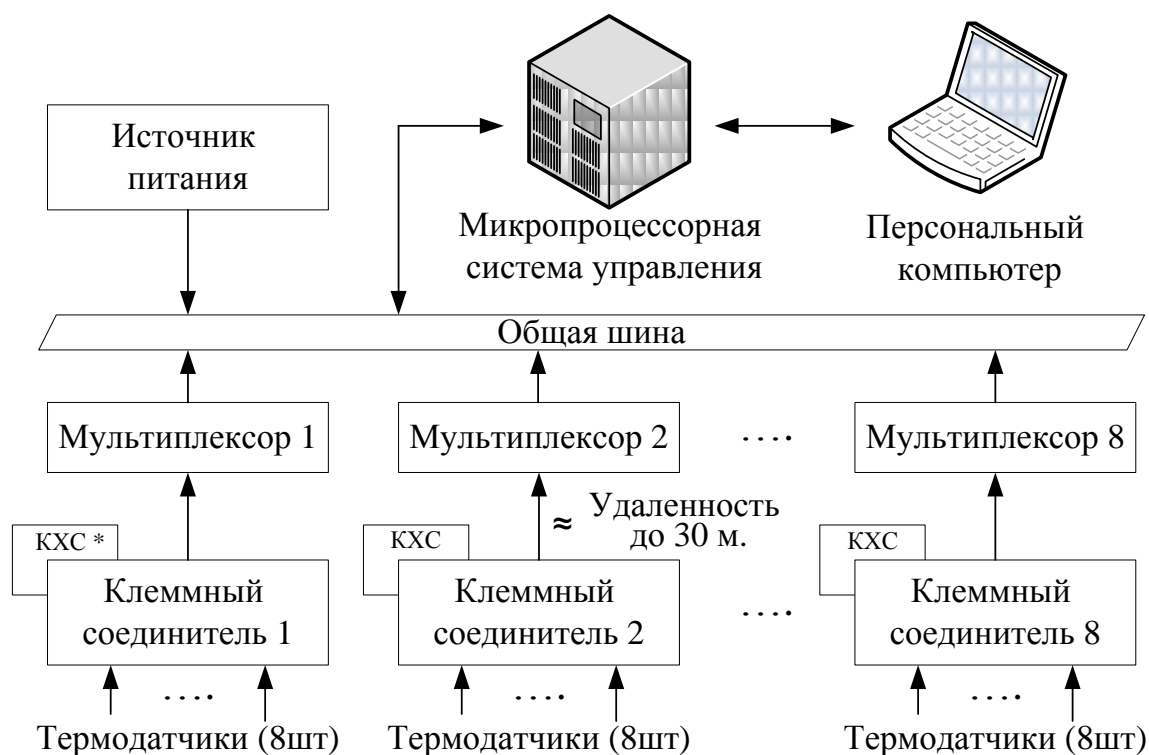
Третья глава диссертационной работы посвящена разработке состава и структуры аппаратной части, алгоритмов обработки данных и функционирования АПК, а также реализации программного обеспечения.

На основании проведенных исследований, предварительных расчетов и теоретических выводов сформулированы основные требования к разрабатываемой аппаратуре.

Проведен патентный поиск среди аналогичных устройств, который показал, что известные, согласно доступным источникам, методики замера и программно-аппаратные комплексы не отвечают требованиям по информативности и оперативности контроля высокотемпературного технологического процесса. В частности при высокотемпературных исследованиях известными методами отсутствует возможность определения температуры в любой точке исследуемого объекта.

Дальнейшее исследования в данной области позволили разработать экспериментальный вариант устройства сбора данных для проведения испытаний при предпусковом обжиге и старте алюминиевого электролизера [2, 8].

Функциональные схемы экспериментальной системы и микропроцессорного модуля управления приведены на рисунках 2 и 3.



(*) КХС - Компенсация холодного спая

Рисунок 2 – Общая, функциональная схема экспериментальной системы



Рисунок 3 – Функциональная схема микропроцессорного модуля управления

Для данной экспериментальной системы разработано программное обеспечение, структура которого представлена на рисунке 4.

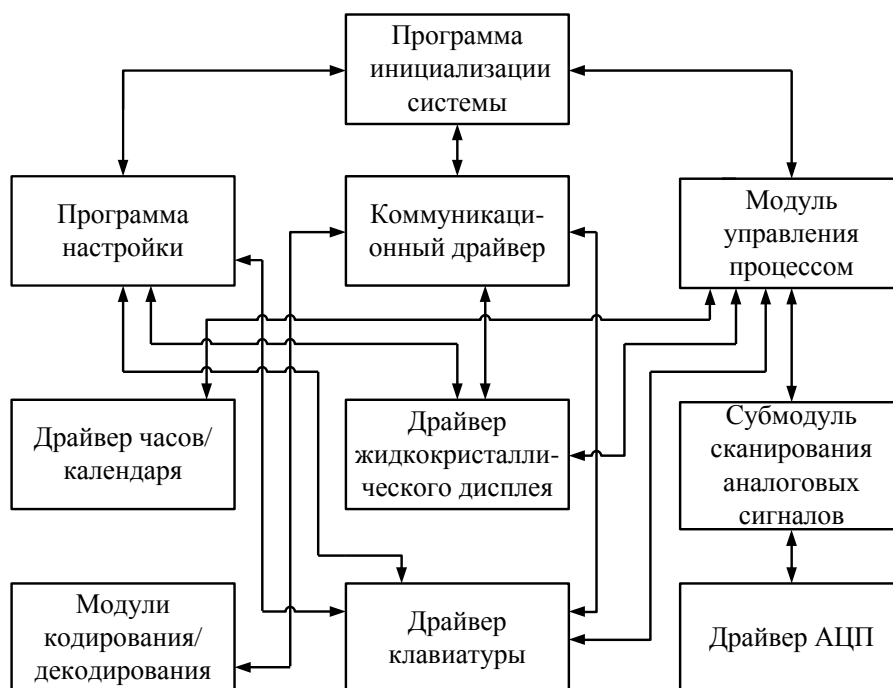


Рисунок 4 – Структура программного обеспечения экспериментальной системы сбора и обработки данных (упрощенно)

Результаты предварительных экспериментов, проведенных в тяжелых промышленных условиях, позволили сделать выводы с одной стороны о

правильности принятых решений эксплуатационного и алгоритмического плана, с другой стороны о недостаточной надежности экспериментального варианта системы. В связи с этим было принято решение о разработке промышленного варианта АПК как многоцелевой, сетевой, распределенной системы сбора и анализа данных [1,4,9]. На рисунке 5 изображена функциональная схема АПК.

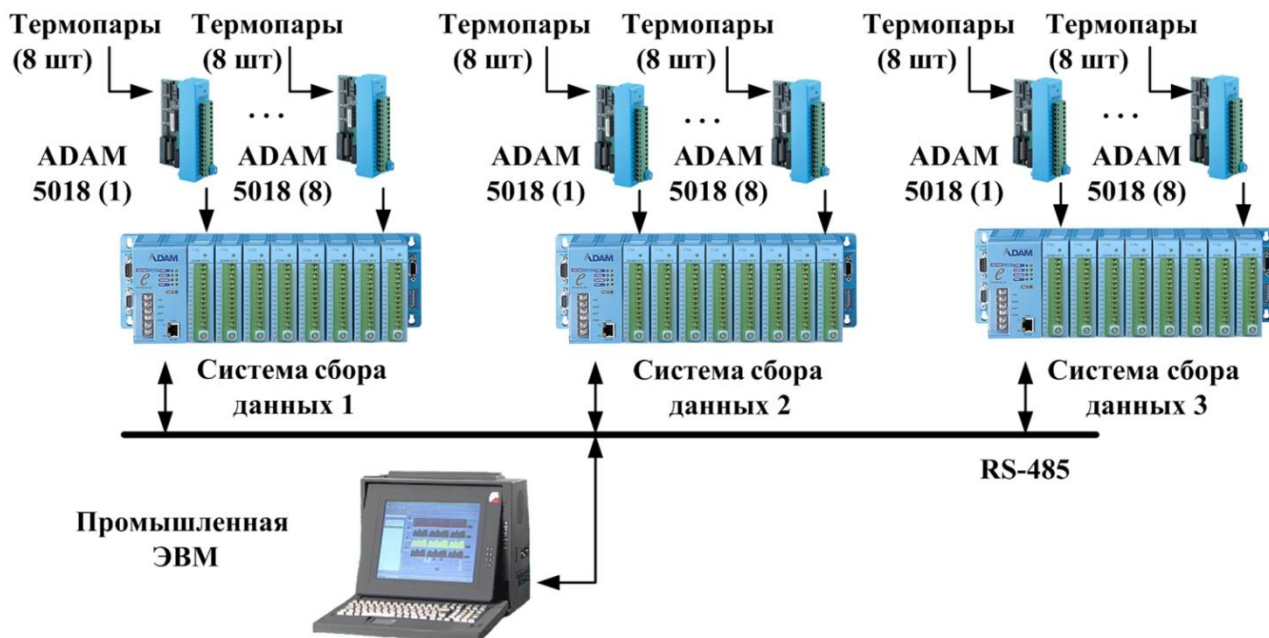


Рисунок 5 – Функциональная схема промышленного варианта АПК

Структура и состав программного обеспечения высокого уровня, разработанного для промышленного варианта прибора изображена на рисунке 6.

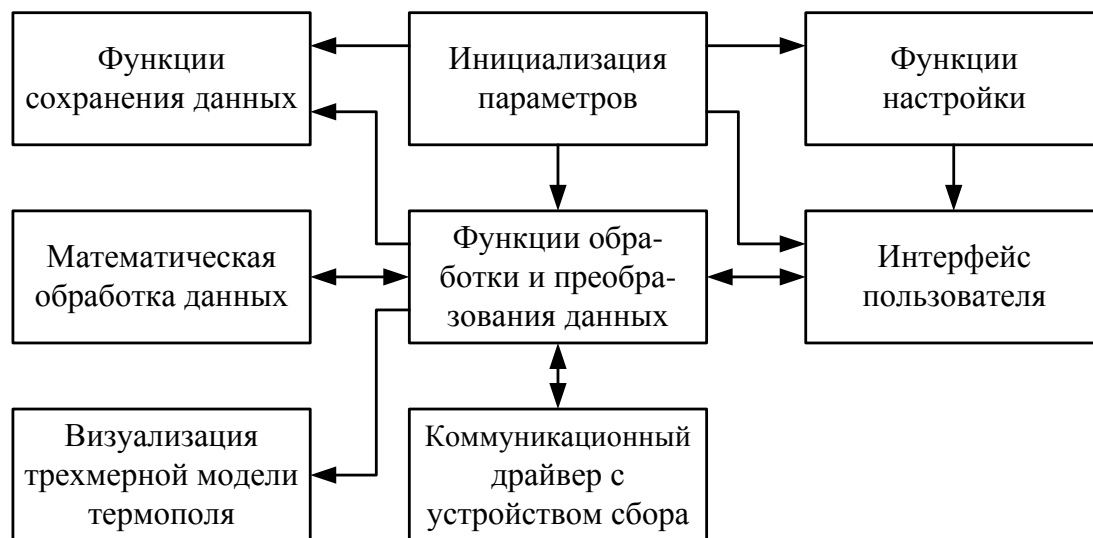


Рисунок 6 – Структура программного обеспечения промышленного варианта АПК (упрощенно)

По результатам исследований и разработок, изложенных в главе 3, следует отметить:

1. Реализованный алгоритм программной фильтрации и обработки информативных сигналов, позволяет снизить уровень помех в исходных данных и в результате получить более точную, с погрешностью не более 5%, и достоверную информацию о распределении температурного поля.

2. Предложенная аппаратная методика построения трехмерного поля позволяет значительно ускорить процесс получения информации о состоянии температуры в исследуемой области по сравнению с известными методами плоскостного или точечного сканирования.

3. Реализованные на основании предложенного метода восстановления температурного поля алгоритмы в сочетании с аппаратными средствами замера позволили получить оперативное и высокоточное построение модели температурного поля. Получена возможность визуального, ручного или автоматизированного контроля распределения температур в технологической области.

В четвертой главе диссертационной работы изложены результаты проведенных экспериментов в лабораторных и промышленных условиях.

В частности, в лабораторных условиях, с целью проверки адекватности предложенного метода, оценки достоверности получаемых данных и точности измерений АПК, выполнены эксперименты с различными материалами (углеграфит, металлы, кирпич) и различными способами нагрева, в среднем по 25 экспериментов для каждого материала и способа, общим количеством порядка 100 экспериментов.

В ходе эксперимента, при нагревании объектов, проводились замеры температуры в контрольных точках К1-К4, расположение которых представлено на рисунке 7, с помощью сертифицированных калиброванных промышленных термометров.

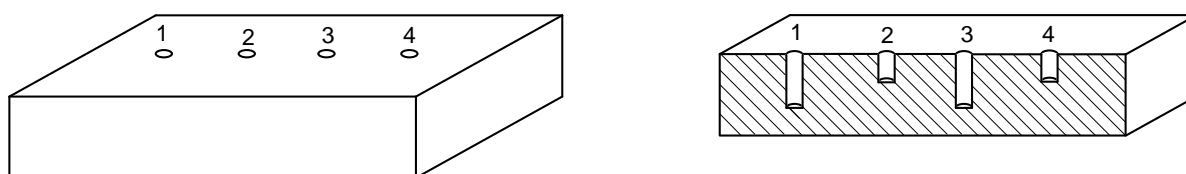


Рисунок 7 – Расположение термопар в контрольных точках

В дальнейшем, эти результаты сравнивались с результатами полученными с помощью АПК на основании разработанного метода и алгоритмов. Результат одного из таких экспериментов с кирпичным блоком приведен ниже. В таблице 2 отображены значения температуры в контрольных точках К1-К4, а на рисунке 8 графики изменения температуры в этих точках.

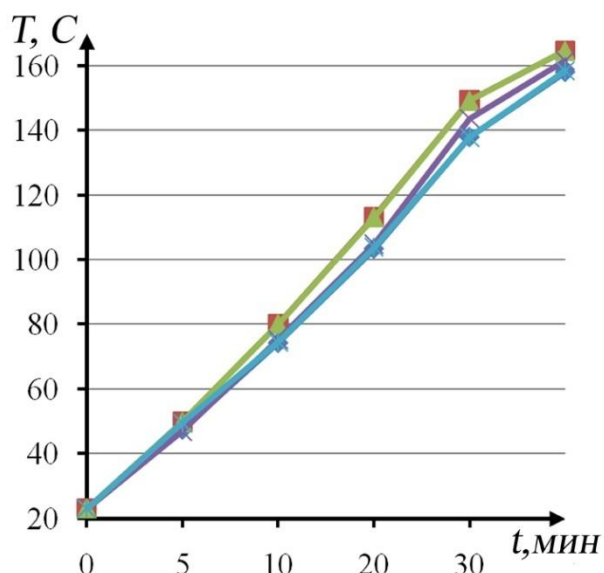
Анализ результата показал что, применение в качестве аппроксимирующей функции уравнения (3) или (4), с 11 и 16 коэффициентами

соответственно, дает недостаточно точный результат, особенно это заметно при эксперименте, где материалом был кирпич.

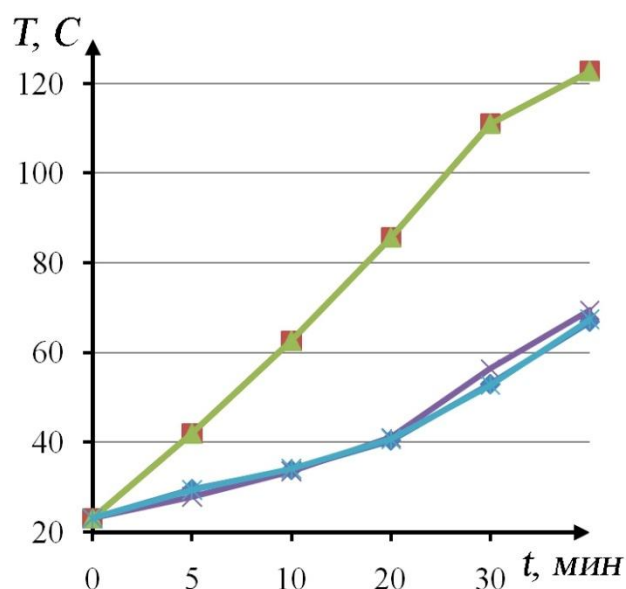
Восстановление температурного поля с помощью уравнений (5) и (6) с 31 коэффициентами показали наилучшие результаты. Средние различия от эталонных значений составляют порядка 2-3%, против 15-20% при уравнениях (3, 4). Однако следует отметить, что при использовании уравнения (6) в случаях, когда температурное поле крайне неравномерно, результат получается более точный, таблица 2. В остальных же случаях использование уравнения (5) более оправдано.

Таблица 2 – Значения температуры, кирпичный блок

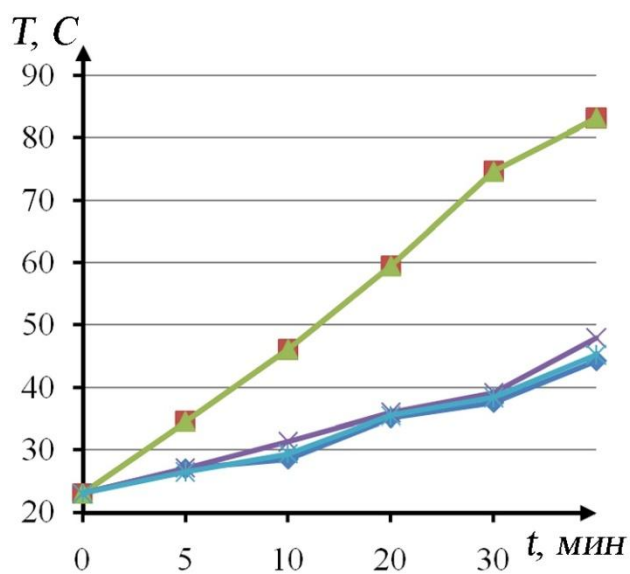
Контроль- ные точки	Источник данных	Время, мин.					
		0	5	10	20	30	45
Точка К1	Эталонные	23	47,39	74,22	103,35	137,91	158,07
	МНК с ур. (3)	23	49,71	80,05	113,17	149,18	164,61
	МНК с ур. (4)	23	49,69	80,04	113,15	149,17	164,62
	МНК с ур. (5)	23	46,81	75,25	104,81	143,58	161,49
	МНК с ур. (6)	23	49.43	74.42	103.80	137.81	158.39
Точка К2	Эталонные	23	29,48	33,80	40,37	52,90	66,84
	МНК с ур. (3)	23	41,93	62,60	85,66	111,02	122,78
	МНК с ур. (4)	23	41,94	62,61	85,67	111,03	122,77
	МНК с ур. (5)	23	27,81	33,47	40,99	56,36	69,41
	МНК с ур. (6)	23	29.32	34.05	40.69	52.65	67.40
Точка К3	Эталонные	23	26,98	28,53	35,14	37,55	44,23
	МНК с ур. (3)	23	34,55	46,12	59,49	74,65	83,16
	МНК с ур. (4)	23	34,56	46,12	59,50	74,66	83,15
	МНК с ур. (5)	23	27,08	31,29	35,98	39,16	47,92
	МНК с ур. (6)	23	26.51	29.39	35.53	38.42	45.24
Точка К4	Эталонные	23	24,47	26,83	28,43	31,44	34,25
	МНК с ур. (3)	23	26,92	28,91	32,31	36,92	41,77
	МНК с ур. (4)	23	26,90	28,90	32,29	36,91	41,78
	МНК с ур. (5)	23	25,52	27,51	29,94	32,89	36,29
	МНК с ур. (6)	23	24.82	27.12	28.19	31.22	34.69



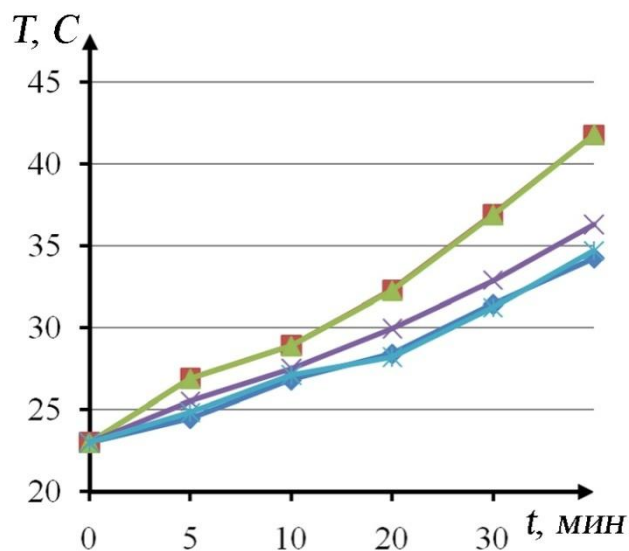
а)



б)



в)



г)



Рисунок 8 – График изменения температуры в контрольных точках: а – точка К1, б – точка К2, в – точка К3, г – точка К4

На рисунка 9 изображено плоскостное распределение температурного поля, которое является малоинформативным. На рисунке 10 изображено трехмерное температурное поле, полученное с помощью разработанного АПК.

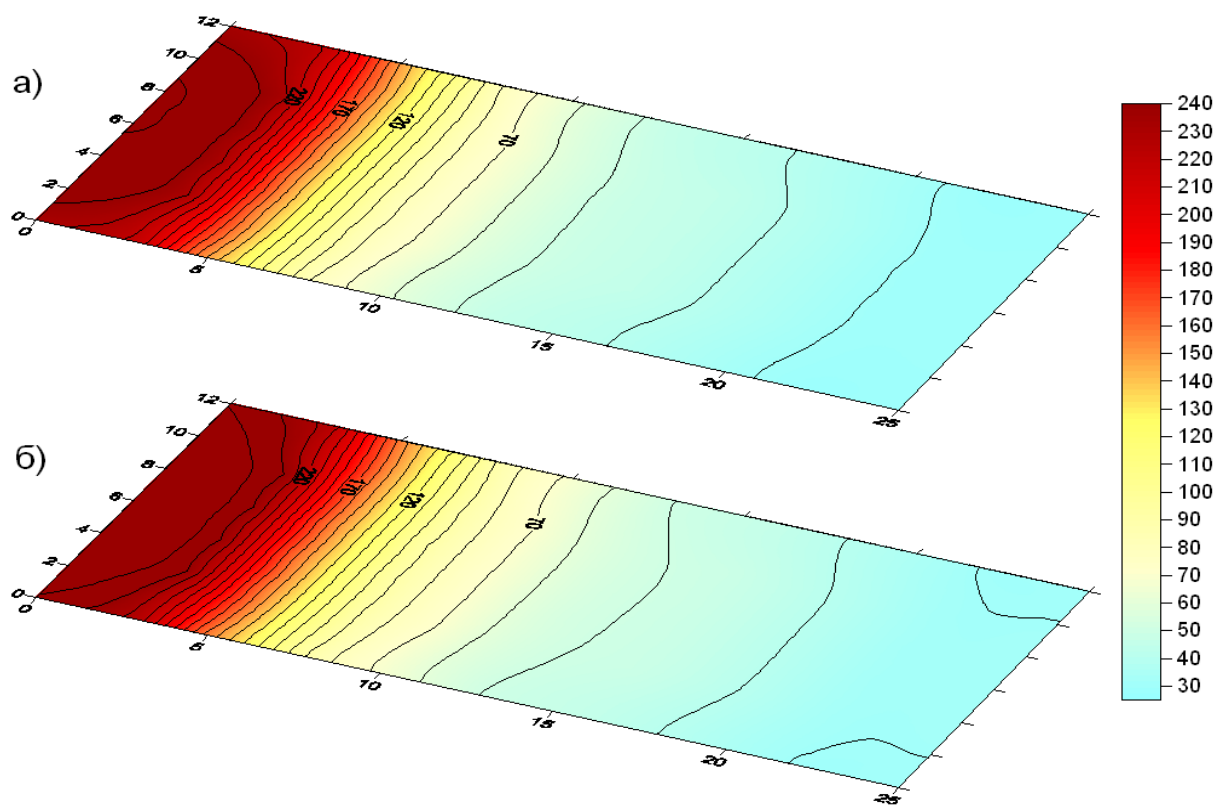


Рисунок 9 – Плоскостное распределение температурного поля: *а* – верхний слой, *б* – нижний слой

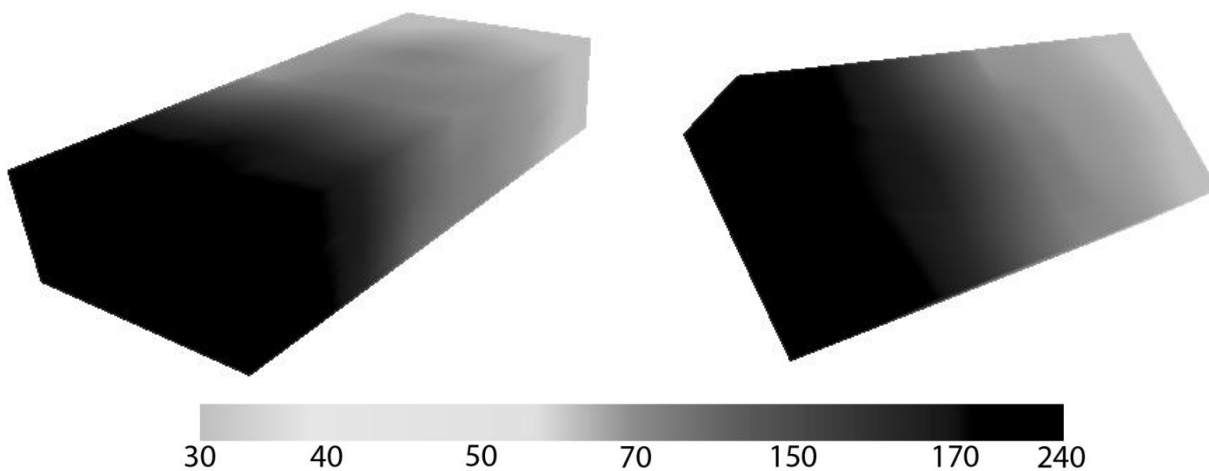


Рисунок 10 – Трехмерное распределение температурного поля

Обработка результатов, полученных в ходе лабораторных испытаний, показала адекватность и достоверность предложенных метода и алгоритмов. Об этом свидетельствуют статистические тесты, выполненные в программном пакете StatSoft Statistica 8 с помощью t-критерия Стьюдента и рангового критерия Вилкоксона. В ходе тестов проводилось сравнения двух выборок данных, одна из которых получена с помощью сертифицированного

калиброванного промышленного термометра, а другая с помощью разработанного АПК.

Достоверность получаемых данных и точность АПК так же были подтверждены промышленными испытаниями на ООО «Красноярский металлургический завод» в ходе поверхностного анализа распределения температурного поля алюминиевого слитка, получаемого путем непрерывного литья, а также, в ходе испытаний на ОАО «РУСАЛ Красноярский алюминиевый завод» при моделировании и измерении параметров обжига, пуска и послепускового периода алюминиевого электролизера.

Результаты проведенных научных исследований и разработок внедрены и активно применяются в учебном процессе ИКИТ СФУ. В частности разработан состав и архитектура лабораторного стенда многофункциональной, сетевой, распределенной системы сбора данных и управления, используемого в процессе обучения студентов и магистров [12, 14], представленного на рисунке 11.

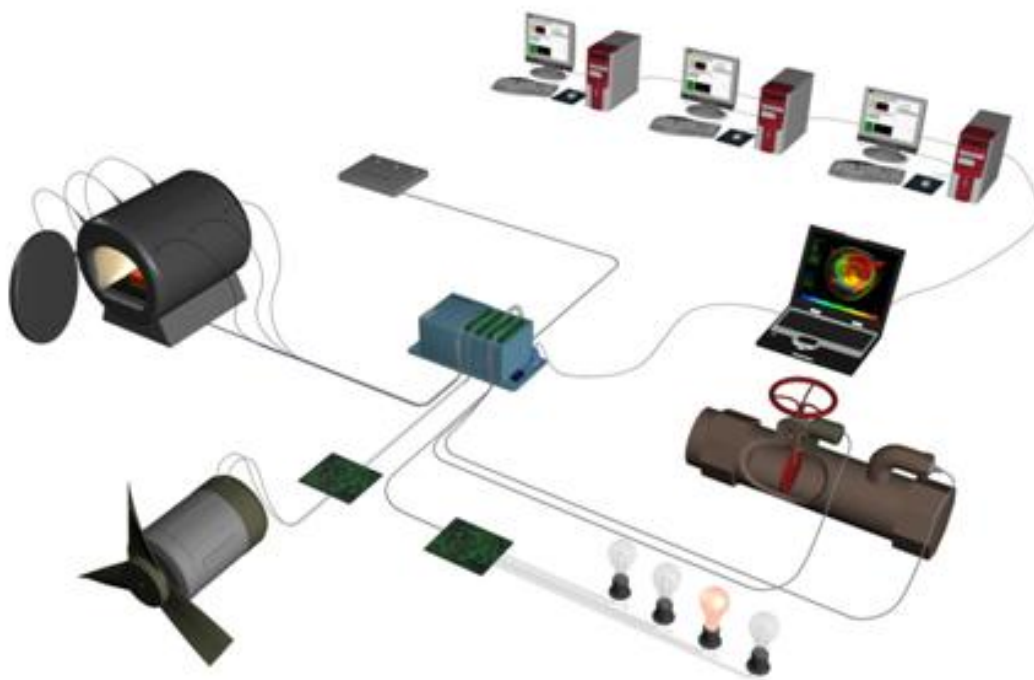


Рисунок 11 – Лабораторный стенд

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате выполнения диссертационной работы были полученные следующие основные научные и практические результаты:

1. Предложено новое решение актуальной научно-технической задачи контроля трехмерного распределения температурного поля в технологической области при производственных процессах, связанных с высокотемпературными нагрузками.

2. Предложен метод восстановления температурного поля для получения информации о состоянии распределения температуры в замкнутом пространстве технологической полости.

3. На основании данного метода предложены алгоритмы обработки и представления результатов в виде трехмерной модели распределения температурного поля, предназначенные для контроля температурных характеристик в технологических процессах, происходящих при высокой температуре.

4. Разработан АПК с целью получения данных о состоянии температур в заданных точках объекта, обработки и анализа данных о состоянии трехмерной модели температурного поля.

5. Проведены экспериментальные испытания АПК в лабораторных условиях и статистическая обработка полученных результатов, подтвердившие достоверность предложенного метода трехмерного анализа температурного поля.

6. Проведены опытно-промышленные испытания АПК на ООО «Красноярский металлургический завод» для построения поверхностного температурного поля слитков полученных методом непрерывного литья, так же подтвердившие достоверность предложенного метода.

7. Результаты работы использовались при моделировании и измерении параметров периода обжига и пуска алюминиевого электролизера ЗАО «Красноярский алюминиевый завод».

8. Результаты проведенных научных исследований и разработок внедрены и активно применяются в учебном процессе ИКИТ СФУ.

Полученные результаты подтверждают правильность выбранных направлений научных исследований, адекватность разработанного метода контроля температурных полей и алгоритмов обработки информативных сигналов, полную работоспособность и промышленную пригодность разработанной аппаратуры. Таким образом, можно с уверенностью констатировать **факт о достижении поставленной цели данной работы.**

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Хабаров В.А. Аппаратный контроль температурных потоков в режиме реального времени / О.В. Непомнящий, Г.А. Скотников, В.А. Хабаров // Известия томского политехнического университета. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – Т. 314, №5. – С. 54-58.

2. Хабаров В.А. Контроль температурного поля алюминиевого электролизера в процессе предстартового пламенного обжига / О.В. Непомнящий, В.А. Хабаров // Естественные и технические науки. – М.: Изд-во «Компания Спутник+», 2009. – №1. – С. 233-236.

3. Хабаров В.А. Сверхбольшие интегральные схемы. Проблемы проектирования / О.В. Непомнящий, Г.А. Скотников, В.А. Хабаров, М.В.

Мадудов // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – Тамбов: [б.и.], 2009. – №6(20). – С. 166-173.

Прочие основные публикации по теме диссертационной работы:

4. Хабаров В.А. Аппаратное построение модели температурного поля / В.А. Хабаров, Е.А. Баранов, О.В. Непомнящий // Наука и технологии. Секция 5. Новые технологии. – Екатеринбург: УрО РАН, 2007. – С. 58-60.

5. Хабаров В.А. Моделирование температурных полей / В.А. Хабаров, Е.А. Баранов, А.Н. Колпаков // Молодежь и наука: начало XXI века: материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 4 ч. Ч.1. – Красноярск:СФУ,2007. – С.17-22.

6. Хабаров В.А. Мониторинг температурных полей алюминиевого электролизера в процессе предстартового пламенного обжига / В.А. Хабаров, О.В. Непомнящий // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации [Текст]: материалы VI Международной научно-технической конференции: в 2 ч. Ч. 1 / редкол.: Е.И. Яцун [и др.]; Курск, гос. Техн. ун-т Курск, 2008. – С. 71-73.

7. Хабаров В.А. Проблемы и решения мониторинга температурного поля в процессе пламенного обжига алюминиевого электролизера / В.А. Хабаров, О.В. Непомнящий // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – Курск, 2008. – №11. – С. 129-131.

8. Хабаров В.А. Метод автоматизированного контроля температурного поля алюминиевого электролизера / В.А. Хабаров, О.В. Непомнящий // Современные технологии в машиностроении: сборник статей XII Международной научно-практической конференции. – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2008. – С. 59-60.

9. Хабаров В.А. Прибор для измерения температурного поля алюминиевого электролизера / В.А. Хабаров, О.В. Непомнящий // Молодежь и современные информационные технологии. Сборник трудов VII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Ч. 1. – Томск: Изд-во СПБ Графикас, 2009, – С. 67-68.

10. Хабаров В.А. Методы и средства акустического неразрушающего контроля высокотемпературных объектов / В.А. Хабаров, М.В. Мадудов, Г.А. Скотников, С.Ф. Тен // Молодежь и наука: начало XXI века: сб. материалов Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых : в 7 ч. Ч.2 / сост. О.А. Половинкина; МИОЦ ФГОУ ВПО «СФУ». – Красноярск, 2009. – С. 37-40.

11. Хабаров В.А.Определение метода автоматизированного контроля при решении задачи управления процессом производства жидкого алюминия / В.А. Хабаров, М.В. Мадудов, Г.А. Скотников, С.Ф. Тен // Молодежь и наука: начало XXI века : сб. материалов Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых : в 7 ч. Ч.2 / сост. О.А. Половинкина; МИОЦ ФГОУ ВПО «СФУ». – Красноярск, 2009. – С. 90-100.

Учебные пособия:

12. Хабаров В.А. Проектирование систем автоматизации технологических процессов : учеб. пособие / Е.А. Вейсов, О.В. Непомнящий, Е.А. Баранов, В.А. Хабаров. – Красноярск: ИПК СФУ, 2008. – 236 с.

13. Хабаров В.А. Микропроцессорные системы : учеб. пособие / О.В. Непомнящий, В.А. Хабаров, Г.А. Скотников – Красноярск: ИПК СФУ, 2009. – 234 с.

14. Хабаров В.А. Микропроцессорные средства автоматизации : учеб. пособие / О.В. Непомнящий, Е.А. Вейсов, В.А. Хабаров, Г.А. Скотников – Красноярск: ИПК СФУ, 2009. – 185 с.

Разработка, зарегистрированная в Реестре программ для ЭВМ РФ:

15. Хабаров В.А. Программа автоматизированного контроля тепловых нагрузок высокотемпературных производственных процессов / В.А. Хабаров, О.В. Непомнящий, Г.А. Скотников, С.Ф. Тен // Св-во гос. регистрации №2009617139 от 24.12.2009 г. – М.: ВНИИЦ, 2009.

Подписано в печать 11.11.2010.
Формат 60x84/16. Уч.-изд. л. ____
Тираж 100 экз. Заказ № ____

Отпечатано в типографии БИК СФУ
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а.