

**И.Н. ИЩУК,
А.И. ФЕСЕНКО,
Ю.Ю. ГРОМОВ**

ИДЕНТИФИКАЦИЯ СВОЙСТВ СКРЫТЫХ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ОБЪЕКТОВ В ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ ВОЛН

Москва
«Машиностроение»
2008

УДК 621.385.69
ББК Z965.06
И98

Р е ц е н з е н т ы:

Доктор технических наук, профессор
Московской государственной академии тонкой
химической технологии им. М.В. Ломоносова
Б.А. Арутюнов

Доктор технических наук, профессор
Тамбовского государственного технического университета
Е.И. Глинкин

Ищук И.Н., Фесенко А.И., Громов Ю.Ю.

И98 Идентификация свойств скрытых подповерхностных объектов в инфракрасном диапазоне волн. – М.: Машиностроение, 2008. – 184 с.
ISBN 978-5-94275-441-9

Рассмотрены теоретические и методологические основы обработки информации в оптико-электронных системах инфракрасного (ИК) диапазона волн на основе детерминированных численных моделей, предназначенных для обработки ИК-изображений скрытых подповерхностных объектов и технического диагностирования теплоизоляционных материалов на основе принципов вычислительной теплофизики. Представлены различные специализированные устройства обработки измерительной информации, средство технического диагностирования теплоизоляционных материалов, а также оптико-электронная система идентификации тепловых свойств и глубины залегания скрытых подповерхностных объектов.

Для аспирантов, адъюнктов и специалистов по вычислительной математике и математическому моделированию в области теплофизики и обработки ИК-изображений.

УДК 621.385.69
ББК Z965.06

Издание осуществлено по гранту Управления образования и науки Тамбовской области по итогам конкурса «Региональная поддержка научных исследований, проводимых ведущими научными школами Тамбовской области» в 2008 году.

ISBN 978-5-94275-441-9

© Ищук И.Н., Фесенко А.И., Громов Ю.Ю.,
2008

Научное издание

Ищук Игорь Николаевич,
Фесенко Александр Иванович,
Громов Юрий Юрьевич

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ СВОЙСТВ
СКРЫТЫХ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ
ОБЪЕКТОВ В ИНФРАКРАСНОМ
ДИАПАЗОНЕ ВОЛН**

Редактор Т.М. Глинка
Корректор О.М. Гурьянова
Инженер по компьютерному макетированию Т.А. Сынова

Сдано в набор 14.11.2008 г. Подписано в печать 24.11.2008 г.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 10,69. Уч.-изд. л. 11,0.
Тираж 400 экз. Заказ 524

ООО «Издательство Машиностроение»,
107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Подготовлено к печати и отпечатано в Издательско-полиграфическом центре
Тамбовского государственного технического университета
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

По вопросам приобретения книги обращаться по телефону 8(4752)63-81-08
E-mail: izdatelstvo@admin.tstu.ru

В последнее время метод теплового неразрушающего контроля (ТНК) получил большое распространение, так как резко растет количество диагностируемых объектов, что обеспечивает безаварийную эксплуатацию авиационных систем при технической диагностике их состояния.

Разработка и внедрение тепловых методов контроля позволяют решить задачу диагностики технического состояния от 30 до 50 % различных изделий и материалов, в том числе и тех, которые традиционными методами не могут быть проконтролированы. К основным преимуществам теплового метода относят [1, 2]:

- большой перечень объектов контроля;
- дистанционность контроля или зондирования объектов, в том числе и опасных объектов;
- высокую производительность и безопасность работ;
- возможность пассивного контроля при одностороннем доступе к объекту;
- возможность автоматизации и аппаратной реализации систем теплового контроля, работающих в реальном режиме времени;
- относительно небольшие финансовые затраты на разработку, создание программно-аппаратных средств и внедрение методики ТНК.

Известно, что ТНК по решаемым задачам в авиационно-космической, атомной, жилищно-коммунальной, металлургической, нефтехимической, энергетической, экологической и других отраслях промышленности подразделяется на два направления [3]:

- обнаружение и определение характеристик дефектов в материалах и изделиях из них (от металлов до многослойных конструкций) и регистрация утечек и разрушений в полимерах и композиционных материалах;
- диагностика технического состояния и ТНК качества тепловыделяющих объектов, напряженных состояний несущих конструкций и т.п.

Исследования в области применения методов инфракрасной термографии в решении задач обнаружения дефектов начались в период 1960 – 1970 гг., когда были применены оптико-электронные системы (ОЭС) инфракрасного (ИК) диапазона спектра в авиационно-космической технике и атомной энергетике [3 – 10]. Однако низкие эксплуатационные характеристики как зарубежных, так и отечественных ИК-систем тех лет сдерживали развитие ТНК.

В настоящее время можно говорить о бурном развитии методологии ТНК и ее интенсивном внедрении в промышленную практику. Основным фактором для этого стало новое поколение ИК-приборов: высокоскоростные тепловизоры с неохлаждаемыми болометрами, высокоточные радиометры, термографы. При этом считается практически стандартом снабжение таких ИК-приборов микропроцессорами предварительной обработки информации и устройствами сопряжения с ЭВМ по высокоскоростным каналам Fair Ware, Line или RS-232.

Использование современных ИК-приборов и систем значительно расширило и спектр их применения, в частности для решения задач экологического мониторинга и ликвидации пожаров [11 – 13].

По своей физической сущности ТНК основывается на прямых методах решения задачи теплопроводности для многослойных объектов. Аналитический подход позволяет качественно оценивать время, мощность теплового излучателя, глубину и толщину дефекта, его тепловые свойства. Численные методы для пассивных стационарных задач ТНК позволяют количественно оценить топологию температурного поля и тем самым выявить локальные аномалии на поверхности объекта контроля и связать их с параметрами внутреннего дефекта. Для активных нестационарных задач ТНК становится возможным учитывать временные характеристики работы излучателя и температурных полей. Алгоритмы решения прямой задачи теплопроводности делают возможным вычислительным путем и с приемлемой точностью оценить возможные параметры тепловых методов обнаружения дефектов и тем самым сократить объем экспериментальных исследований. Кроме прямых методов решения задачи теплопроводности для ТНК возросло количество работ, посвященных методам решения обратных задач теплопроводности, позволяющих по результатам измерения температурных полей на поверхности объекта контроля оценить параметры внутренних дефектов [1, 2, 14 – 18].

Наряду с интенсивным внедрением ТНК практически во всех отраслях промышленности продолжают исследования по применению ИК-термографии и в военной технике. На основе принципов нестационарного ТНК применяются тепловые методы выявления скрытых в грунте мин.

Так, например, миноискатель VMMD (США) использует двухполосную тепловизионную аппаратуру, которая позволяет на фоне подстилающей поверхности обнаруживать мины [19]. Также в вооруженных силах США применяются наשלемые тепловизоры в качестве дополнения к штатным приборам обнаружения, основанным на других физических принципах. Мина как инородное тело, внесенное в почву, искажает ее излучательные и тепловые свойства. При периодически меняющемся солнечном излучении над миной возникает динамический температурный сигнал, достигающий своего максимума в определенное время суток. Применяя специализированный вычислитель, сравнивающий сигнал с заданным уровнем порога чувствительности температурного сигнала, оператор получает информацию об обнаружении мины [1]. В Японии разработан робот-сапер со встроенным в него компьютером и инфракрасными датчиками [20]. Известны отечественные способы поиска мин с использованием ИК-излучения, при которых исследуемую область сканируют в инфракрасном диапазоне, принимают сигналы, сравнивают их с пороговым значением. При превышении амплитуды сигнала указанного порога вырабатывается сигнал, по которому судят о наличии аномального объекта [21]. В частности, известен способ обнаружения мин в почве, при котором облучают поверхность почвы энергией СВЧ и контролируют прирост температуры, получающийся в результате нагрева почвы, на разных участках в зависимости от наличия мины в почве. Сопоставляя контуры участка, на котором зафиксирован прирост температуры, с характерными размерами мины, судят о ее наличии в почве [22].

Недостатком такого подхода является низкая вероятность обнаружения. Чувствительность ИК обнаружителей такого типа имеет сильную зависимость от критерия обнаружения мины – разницы температур между «фоном» и грунтом над миной, которая равна долям градуса Цельсия, что может приводить к пропуску мины или частым «ложным тревогам».

Основная задача поиска объекта в грунте – определение формы и его размеров по результатам измерений физического (электромагнитного, теплового, гравитационного) поля объекта контроля, относится к классической и далека от своего полного решения. В наиболее ответственных случаях, ввиду отсутствия надежных методов ее решения как обратной коэффициентной задачи, она обычно формулируется как задача распознавания объекта по его «образу» – карте измеренных эталонных образов типовых объектов и решается методами нейронных сетей, вычисления взаимной корреляции и родственных им. Такой подход, по сути, базируется на анализе имеющейся базы данных измерений безотносительно к происходящим физическим процессам, а распознавание нового типа объекта связано как с пополнением базы данных, так и с «обучением обнаружителя» – дополнением системы правил, определяющих алгоритм распознавания.

Предлагаемая методология обработки ИК-изображений подповерхностных объектов, скрытых слоем грунта, основывается на общефизических и системных принципах (рис. 1) соответствия математической модели физическому объекту с применением эталонов, вариационного исчисления, невязки и итераций, кроме того, на принципе обнаружения по тепловым свойствам и принципе реконструкции объединением тепловой томограммы и глубинограммы.



Рис. 1. Методология обработки ИК-изображений подповерхностных объектов

В книге рассмотрены вопросы численного решения прямой нелинейной задачи теплопроводности и коэффициентной обратной задачи применительно к тепловому неразрушающему контролю [23]. В главе 1 описаны физические принципы ТНК и модели дефектов, существующие критерии дефектности, методика обработки ИК-изображений на основе идентификации тепловых свойств скрытых подповерхностных объектов. В главе 2 приведены численные решения прямой задачи теплопроводности с разрывными коэффициентами и внутренним источником тепла для двумерного и трехмерного пространств. Глава 3 раскрывает численные методы решения коэффициентной обратной задачи идентификации тепловых свойств твердых материалов. В главе 4 представлена численная модель нелинейной задачи теплопроводности при нагреве излучением. В главе 5 описана методика решения задачи идентификации тепловых свойств подповерхностных объектов в инфракрасном диапазоне волн. Глава 6 посвящена отдельным направлениям применения рассматриваемых методов и ИК оптико-электронных средств для решения задачи выделения и реконструкции 3D-изображений подповерхностных объектов.

Представленный материал сопровождается экспериментальными данными и программными реализациями вычислительных алгоритмов, выполненных в Тамбовском высшем военном авиационном инженерном училище радиоэлектроники (военном институте).

Авторы выражают благодарность Ю.В. Чудинову и А.С. Скрипкину за непосредственное участие в изготовлении экспериментальных устройств и в проведении ряда важных испытаний, обработка данных которых позволила подтвердить практическими результатами теоретические положения работы.

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОВЫХ МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ (ОБЪЕКТОВ)

Тепловое обнаружение дефектов основывается на методах теплового неразрушающего контроля (ТНК) изделий по анализу их температурных полей.

Объектами ТНК являются материалы, содержащие трещины, пустоты, поры, раковины, инородные включения, непроклеи, непровары и другие дефекты.

В соответствии с ГОСТ 23483–79 различают активный и пассивный методы ТНК в зависимости от наличия или отсутствия внешнего источника излучения, кроме того, методы различаются по взаимному расположению источника излучения, ИК-приемника и последовательности производимых операций. Методы ТНК могут быть односторонними, двусторонними, комбинированными, синхронными, несинхронными, а по способу измерения температуры контактными и бесконтактными [3]. В данной работе рассматривается только нестационарный метод ТНК при одностороннем нагреве, который реализован путем интеграции принципов теплофизики, дискретной математики и вычислительной техники – вычислительной теплофизики [24].

1.1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Обычная практика показывает, что объекты реального мира можно изучать с помощью как физического, так и математического моделирования.

При физическом моделировании на модели воспроизводится изучаемое явление либо отдельные свойства объекта с сохранением их физической природы. Заведомо более широкими возможностями обладает математическое моделирование. По сравнению с физическим методом математическое моделирование более универсально, так как:

- позволяет с помощью одного настроенного устройства (имеется в виду ЭВМ с развитой периферией и специализированным программным комплексом) осуществить решение целого класса задач, имеющих одинаковое математическое описание;
- обеспечивает простоту перехода от одной задачи к другой за счет изменения значений параметров исследуемой системы, различных возмущений и начальных условий;
- благодаря декомпозиции дает возможность моделировать (отрабатывать) систему по частям;
- использует непрерывно совершенствующуюся вычислительную технику.

Существуют математические модели двух типов: ориентированные, с одной стороны, на аналитические методы решения задачи, а с другой – на широкое использование современных численных методов и ЭВМ. С помощью первых моделей наиболее полное исследование можно провести лишь в том случае, когда удастся построить в явном виде зависимости, связывающие искомые величины с параметрами объекта и начальными условиями. Однако такие решения можно получить для простых объектов, на слишком упрощенных расчетных схемах. Для примера отметим здесь цикл работ по определению тепловых свойств (ТС) методом импульсного источника тепла 1970 – 1990-х гг. [25 – 28], выполненных с использованием приближенной математической модели:

$$T(r, \tau) = \frac{Q}{2\pi\lambda\tau} \exp\left\{-\frac{r^2}{4a\tau}\right\}, \quad \tau > 0, \quad (1.1)$$

где T – температура; r – расстояние между источниками тепла и термодатчиком; τ – время; λ – теплопроводность; Q – количество тепла, выделяемого линейным источником; a – температуропроводность.

Данные модели применимы для проведения глубокого анализа и обобщения результатов. Надо отметить, что в последнее время намечается тенденция совместного использования аналитических и численных методов [29]. Чаше всего темпы развития «аналитических» моделей не поспевают за запросами практики, при этом математические процедуры настолько стали сложными и трудоемкими, что для овладения ими требуются высокоподготовленные специалисты.

Под математической моделью (ММ) понимается описание явлений, выраженное с помощью математической символики. Для тепловых явлений строится иерархический ряд тепловых схем (тепловых моделей) и иерархический ряд ММ [24].

Математической моделью I рода, неявной ММ, называют исходную ММ, полученную из законов сохранения, законов термодинамики. Математической моделью II рода, явной ММ, называем результат решения задачи. Это зависимость температуры от причин, приводящих к изменению теплового режима поля температуры. Явная ММ может быть получена в результате аналитического или численного решения и в результате физического эксперимента. Если известна ММ I рода и в результате аналитических или численных решений (вычислительного эксперимента) решить задачу нельзя, то физический эксперимент является методом решения математической задачи. Если нельзя решить задачу из-за невозможности составить ММ I рода, то с помощью физического эксперимента разрабатывается неявная ММ, решаемая методами идентификации. Методы идентификации – методы построения явных и неявных ММ исследуемого процесса – в этом случае только формально позволяют построить ММ, но эта модель не отражает физической сути, физических законов, а является лишь результатом обработки экспериментальных данных.

На рис. 1.1, $a - z$ показаны пути исследования физических явлений [24] при использовании аналитических моделей, использовании численных методов, использовании численных методов на основе натуральных экспериментов, использовании натуральных экспериментов и аналитических математических моделей, соответственно. Схемы построения тепловой модели на рис. 1.1, $a - b$ предполагают переход к модели, учитывающей только тепловые эффекты. На этом пути производятся упрощения, принимаются допущения, но эти упрощения и допущения говорят о том, что исследователь знает о связанных с ними ошибках.

При переходе от физической реальности к тепловой схеме возможны потери информации, о которых мы и не предполагаем. В этом отношении схема на рис. 1.1, z имеет преимущество, так как температурные поля (тепловой режим) определяются непосредственно на физическом объекте. Наличие физически обоснованной тепловой схемы позволяет построить неявную ММ тепловых явлений, известных исследователю.

На путях построения неявных или явных ММ неизбежны допущения, упрощения, о которых знает исследователь. После построения неявной ММ могут быть применены методы и средства решения поставленной математической задачи. Неявная ММ – поставленная математическая задача, которая очень часто может быть решена аналитическими или численными методами.

При этом вычислительные средства могут применяться как для получения численных значений из аналитических явных моделей, так и для получения численных явных моделей. В этом случае (рис. 1.1, b) численные результаты аппроксимируются, идентифицируются для получения аналитических выражений. Но такие явные ММ – результат обработки численных данных, т.е. форма аналитического выражения и ее коэффициенты – результат искусственного построения явной ММ.

Иногда после анализа явной ММ (рис. 1.1, b), полученной после аппроксимации или идентификации (структурной и параметрической), меняют форму и находят коэффициенты неявной ММ.



Рис. 1.1. Пути исследования физических явлений

Схема исследования физической реальности, показанная на рис. 1.1, в, отличается от схемы на рис. 1.1, б тем, что она отражает не только процедуры решения прямых задач. В нее по сравнению с рис. 1.1, б введен эксперимент, без которого построение феноменологических моделей невозможно. Имея неявную или явную ММ прямой задачи (ПЗ), используя натуральный эксперимент, можно при определенных условиях решить инверсную задачу и построить физически оправданную неявную ММ. В схеме на рис. 1.1, в подчеркнуты две особенности таких путей построения теорий: численные методы исследования неявных ММ и обязательное вмешательство натурального эксперимента.

На рис. 1.1, г показан случай, который, к сожалению, имеет место в теплофизике, когда причинно-следственные связи установлены так, что неявная модель требует уточнений. Натуральный эксперимент дает численные данные, которые обрабатываются для получения явной модели. Эта модель в некоторых случаях может помочь составить неявную ММ, но такая ММ не отражает гипотезы и законы. Она является удобной формой для последующих математических преобразований.

Необходимо отметить, что ядром математического моделирования является понятие математической модели. Принято считать, что всякое применение математических методов есть математическое моделирование. Такая узкая трактовка понятия математической модели уже не отвечает общепринятым представлениям о потенциальных возможностях современной науки. Преимущество новой методологии научно-прикладных исследований [24] по сравнению с традиционными методами заключается в одновременном использовании всей триады «модель – алгоритм – программа на ЭВМ».

В современном расширенном понимании математическая модель – это совокупность математических зависимостей и логических соотношений, реализуемых в виде пакета прикладных программ на ЭВМ, исходных данных средств общения с ЭВМ, обработки и представления получаемой информации, позволяющих адекватно отражать существенные характеристики объектов в реальных условиях эксплуатации и их изменение в обозримом масштабе времени.

Таким образом, полная математическая модель объекта содержит в себе модель элементов системы и связей между ними, которые описываются алгоритмами, реализованными в виде прикладных программ.

Следовательно, для создания полной математической модели необходимо разработать алгоритмы и программы, позволяющие решить как прямую, так и обратную задачу теплопроводности, основываясь на принципах вычислительной теплофизики.

В работах [30, 31] подробно рассматриваются принципы обработки информации на основе численного решения нелинейной задачи теплопроводности для:

- дискретной ММ прямой задачи теплопроводности с разрывными коэффициентами и внутренним импульсным источником тепла для двумерного и трехмерного пространства;
- дискретной ММ прямой задачи теплопроводности при нагреве излучением для трехмерного пространства;
- дискретной ММ обратной задачи теплопроводности при нагреве излучением для трехмерного пространства, и решения задачи теплового обнаружения подповерхностных объектов.

1.2. МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ (ОБЪЕКТОВ) НА ОСНОВЕ ТЕРМОГРАФИИ

Принцип обнаружение внутренних дефектов в материале с использованием внешнего источника излучения представлен на рис. 1.2. На плоскую поверхность исследуемого материала ($z = 0$) воздействуют источником нагрева, при этом на поверхности материала непрерывно измеряют избыточные значения температур в некоторых заданных точках (0 – 3).

Дефекты для теплового потока от излучателя являются теплопроводниками (если значения их ТС больше значений ТС испытываемого материала), вследствие чего тепловой поток «протекает» через дефекты (рис. 1.2, а, дефекты № 1, 2). И наоборот, дефекты будут оказывать тепловое сопротивление тепловому потоку (если значения их ТС меньше значений ТС испытываемого материала) и, следовательно, тепловой поток, распространяясь вглубь материала, «обтекает» дефекты (рис. 1.2, а, дефект № 3).

На рис. 1.2, а видно, что над областью дефектов происходит искажение температурного поля, в частности для дефектов с ТС больше ТС испытываемого материала температурный перепад (точки измерения 1, 2) ниже температуры над бездефектной областью (точка измерения 0). Для дефекта с ТС меньше ТС испытываемого материала температурный перепад (точка измерения 3) выше температуры над бездефектной областью.

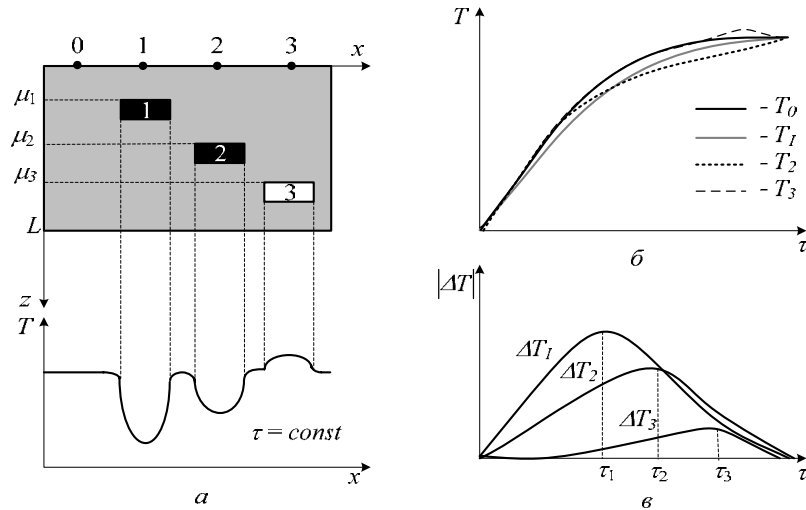


Рис. 1.2. Графическая интерпретация принципов теплового обнаружения дефектов (объектов)

О наличии дефекта (объекта) судят по результату анализа температурного поля на основе критерия дефектности [3]:

$$\Delta T(\tau) \geq s \sqrt{\overline{\Delta T_{\text{ап}}^2}}; \quad (1.2)$$

$$A(\tau) \geq s \sqrt{\overline{\Delta T_{\text{п}}^2}} / T^2(\tau), \quad (1.3)$$

где $A(\tau) = \Delta T(\tau)/T(\tau)$ – температурный контраст; s – отношение сигнал/шум; $\Delta T(\tau)$ – абсолютный температурный перепад над дефектом; $\overline{\Delta T_{\text{ап}}^2}$ – среднее квадратическое значение аддитивного аппаратного шума; $T(\tau)$ – средняя температура нагрева, избыточная относительно начальной температуры (температура в точке 0, рис. 1.2, а, б); $\overline{\Delta T_{\text{п}}^2}$ – среднее квадратическое значение структурной мультипликативной помехи, приведенной к значениям температуры.

Отличие данных критериев заключается в выборе источника помехи. Помехой может являться аппаратный шум фотоприемника, тогда применяется неравенство (1.2), либо интегральная помеха, возникающая как совокупность помех всей диагностирующей системы, выраженная в структурной мультипликативной помехе (1.3).

Аналогичный подход на основе удельной обнаружительной способности используется в зарубежных тепловых дефектоскопах [4, 5].

Важным параметром теплового обнаружения является чувствительность, так, чувствительность ТНК дефектов и толщины при использовании амплитудного критерия дефектности (1.2) и (1.3) оценивают согласно выражениям [1]:

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{\Delta T}{d} \left(\frac{\partial T}{\partial d} \right)^{-1}; \quad \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta T}{L} \left(\frac{\partial T}{\partial L} \right)^{-1},$$

где d – поперечные размеры дефекта; L – толщина испытываемого материала.

Согласно приведенным данным в работе [10], при ТНК многослойных материалов на глубине до 10 мм выявляются дефекты площадью 0, 25 см², на глубинах до 20 мм – площадью 2 см². При ТНК дюралюминиевых листов толщиной от 0,8 до 2 мм обнаруживался 5 %-ный унос дюралюминия в зонах диаметром 1 см и более [1]. Обобщенные данные по обнаружению дефектов с параметрами: μ – глубина залегания, d – толщина, h – поперечный размер, S – площадь, приведены в табл. 1.1 [10].

1.1. Чувствительность ТНК различных материалов

Тип и толщина материала	Минимальные параметры обнаруживаемого дефекта
Композиционные материалы:	
пластик (3 мм) – металл (5 мм) – пластик (3 мм)	$L = 11 \text{ мм}, S = 2,5 \text{ см}^2$
металл (6 мм) – пластик (3 мм) – металл (6 мм)	$S = 20 \times 20 \text{ мм}$
фиберглас (3,2 мм) – сота алюминиевая	$h = 5 \dots 50 \text{ мм}$
Неметаллы:	
резина	$S = 0,5 \text{ см}^2$ при $\mu = 2 \text{ мм}$, $S = 1 \text{ см}^2$ при $\mu = 5 \text{ мм}$, $S = 3 \dots 4 \text{ см}^2$ при $\mu = 7 \text{ мм}$
стеклопластик (7 мм)	$S = 225 \text{ мм}^2$ при $\mu = 5 \text{ мм}$
стеклопластик (12 мм)	$S = 1 \text{ см}^2$ при $d = 0,1 \text{ мм}$
Металлы:	
сталь	Дефекты в виде рисок $d = 40 \text{ мкм}, h = 1 \text{ мм}$, двумерный дефект $h = 0,32 \dots 0,95 \text{ мм}$
алюминий	При толщине стенки теплового-деляющего элемента $0,7 \text{ мм}$ обнаруживается дефект диаметром 10 мм

Классическим ИК-прибором активного ТНК многослойных пластин является устройство, содержащее ИК-излучатель и ИК-приемник, неподвижно расположенные на заданной высоте или движущиеся вдоль объекта контроля с постоянной скоростью [3].

В работе [2] показано, что при $S = 0,15 \text{ см}^2$ автоматизированная система ТНК сплошности листового проката обеспечивает обнаружение дефектов диаметром 5 мм и раскрытием $0,05 \text{ мм}$ с погрешностью по площади и контурам не более 12% .

Известна отечественная оптико-электронная система для экологического мониторинга земли «Терма-2» [11 – 13], обладающая характеристиками: температурное разрешение $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$, мгновенный угол обзора $1,85$, элемент разрешения с высоты $100 \text{ м} - 0,05 \text{ м}$, быстродействие $0,39 \text{ с}$. Данная система позволяет при полете на МИ-8Т с высоты 300 м обнаруживать металлический продуктопровод диаметром $0,05 \text{ м}$, изолированный битумной лентой толщиной 2 мм , расположенный на глубине $1,5 \text{ м}$. Пороговое значение избыточной температуры для критерия обнаружения в данной системе составляет $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$.

В последнее время стал применяться временной критерий дефектности [1]

$$|\Delta\tau/\tau| \geq s\sqrt{\Delta\tau^2/\tau^2}, \quad (1.4)$$

где $\Delta\tau$ – сдвиг характерного момента теплопередачи во времени, обусловленный дефектом; $\overline{\Delta\tau^2}$ – дисперсия временного шума.

Так, если $\Delta\tau$ определить как момент времени наступления максимального значения $\Delta T(\tau)$, то, зная возможные ТС дефекта, можно определить место и глубину его залегания (рис. 1.2, в). В этом случае говорят о тепловой томографии – послойном представлении структуры объекта путем анализа сигналов во временной области при одностороннем тепловом неразрушающем контроле [32].

В тепловой томографии разрешение системы по глубине сводится к разрешению по времени задержки $\Delta\tau_{\text{пор}}$, которая связана с $\Delta T_{\text{ан}}$ системы контроля соотношением [1]

$$\frac{\partial[\Delta T(\mu_i, \tau^*)]}{\partial\tau} \Delta\tau_{\text{пор}} = \Delta T_{\text{ан}}, \quad (1.5)$$

где τ^* – момент времени регистрации сигнала ΔT ; μ_i – выделенный по глубине прогрева слой испытуемого материала.

В общем случае $\Delta T_{\text{ан}}$ определяется экспериментально для каждой системы контроля, в идеале $\Delta T_{\text{ан}} = sT_{\text{пор}}$, где $T_{\text{пор}}$ – пороговое значение ΔT , при превышении которого вырабатывается сигнал обнаружения.

Толщину слоя $\Delta\mu_i$, выделяемого по глубине прогрева испытуемого материала, рассчитывают согласно выражениям [1]

$$\frac{\partial \tau^*(\mu)}{\partial \mu} \Delta \mu_i = \Delta \tau_{\text{пор}}; \quad (1.6)$$

$$\Delta \mu_i = \frac{\Delta \tau_{\text{пор}} \partial \mu}{\partial \tau^*(\mu)} = \frac{\Delta T_{\text{ап}} \partial T(\mu_i, \tau^*)}{\partial [\Delta T(\mu_i, \tau^*)]} \frac{\partial \tau^*(\mu)}{\partial \mu}. \quad (1.7)$$

При использовании $\tau^* = \tau_{\text{max}}$ число разрешаемых слоев может достигать 8 – 10 [33].

Данный подход к обнаружению дефектов (объектов) характеризуется неоднозначностью решения. Эффекты сглаживания температуры в испытуемом материале и временное запаздывание температурных сигналов в результате инерционности приемников ИК излучения существенно усложняют идентификацию внутренних геометрических и ТС дефектов по результатам измерения температуры на поверхности материала. Физически это означает, что некоторому набору измеренных избыточных температур могут соответствовать дефекты большого объема и находящиеся на большой глубине или наоборот мелкие дефекты, находящиеся на небольшой глубине, т.е. решение задачи обнаружения дефектов (объектов) в такой постановке является неустойчивым.

1.3. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ ВОЛН НА ОСНОВЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ СКРЫТЫХ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ОБЪЕКТОВ

Из больших потенциальных возможностей теплового неразрушающего контроля в настоящее время используется только качественное оценивание неравномерности их температурных полей. Внедрение теплового метода НК сдерживается следующими причинами [2]:

- недостаточным уровнем математического моделирования тепловых процессов;
- недостаточной проработкой методов обнаружения дефектов в процессе автоматизированного ТНК, пригодных для использования на практике. Фактически в настоящее время применяется один метод – определение порогового значения сигнала по эталону;
- недостаточной проработкой методов определения характеристик и типов обнаруживаемых дефектов.

Основная задача тепловой дефектоскопии – определение формы и размеров дефекта по результатам измерений температурного поля объекта контроля, относится к классической и далека от своего полного решения. В наиболее ответственных случаях ввиду отсутствия надежных методов ее решения как обратной коэффициентной задачи она обычно формулируется как задача распознавания объекта по его «образу» – карте измеренных эталонных термограмм и решается методами нейронных сетей и родственными им. Такой подход, по сути, базируется на анализе имеющейся базы данных измерений безотносительно к происходящим физическим процессам, а распознавание нового типа дефекта связано как с пополнением базы данных, так и с «обучением системы» – дополнением системы правил, определяющих алгоритм распознавания. Не подвергая сомнению эффективность использования подобных подходов, предлагается реализация элементов распознающей системы на базе решения обратной задачи теплопроводности. Алгоритм реализации определяется необходимостью решения следующих задач [34]:

- численное решение нелинейной задачи теплопроводности, при этом тепловое моделирование выполняется на основании результатов экспериментальных исследований;
- моделирование дефекта и численное решение нелинейной задачи теплопроводности с учетом дефекта;
- выработка критерия обнаружения объекта на основе идентификации его ТС и глубины залегания;
- решение коэффициентной обратной задачи теплопроводности в вариационной постановке.

Следовательно, основной подход для решения задачи теплового обнаружения: «...концепция теплового контроля, согласно которой внутренние дефекты рассматриваются как локальные изменения ТС основного изделия, в результате задача дефектоскопии сводится к задаче измерения ТС» [23].

Рассмотрим в общем случае процесс формирования ИК-изображения на поверхности грунта.

Пусть в пространстве грунта имеется один скрытый подповерхностный объект (СПО), за которым ведется наблюдение (рис. 1.3).

Информацию о физических характеристиках этого объекта несут излучаемые им ИК-волны, и в частности о тепловых свойствах (ТС), форме и глубине залегания [5, 35].

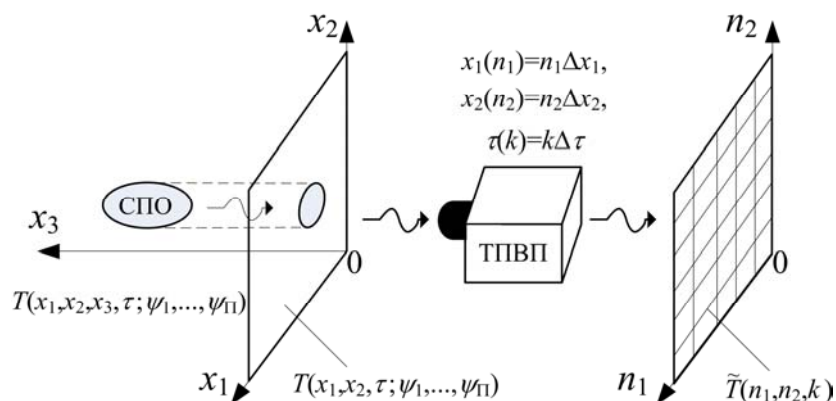


Рис. 1.3. Процесс наблюдения СПО в ИК-диапазоне волн

Процессы теплопроводности в грунте при наличии СПО в достаточно общем виде формализуются функцией температуры $T(x_1, x_2, x_3, \tau; \psi_1, \dots, \psi_{II})$, где x_1, x_2, x_3 – пространственные координаты, τ – время, ψ_1, \dots, ψ_{II} – определяющие параметры, от которых зависит процесс теплопроводности в грунте. Аналогичным образом представим функцию, характеризующую температурное поле на поверхности грунта $T(x_1, x_2, \tau; \psi_1, \dots, \psi_{II})$. Для регистрации температурных полей используется цифровой тепловизионный приемник (ТПВП), при этом ИК-изображение объекта в плоскости приемника характеризуется набором термограмм $\tilde{T}(n_1, n_2, k)$. При регистрации ИК-изображения ТПВП осуществляет его пространственную и временную дискретизацию в соответствии с выражениями: $x_1(n_1) = n_1 \Delta x_1$, $x_2(n_2) = n_2 \Delta x_2$, $\tau(k) = k \Delta \tau$, где Δx_i ($i = 1, 2$) – интервалы дискретизации двумерного непрерывного ИК-изображения; $\Delta \tau$ – интервал дискретизации изображения по времени; n_1, n_2, k – соответствующие номера отсчетов, $n_1 = 0, 1, \dots, N_1$, $n_2 = 0, 1, \dots, N_2$, $k = 1, 2, \dots, K$, $N_1 \times N_2$ – размер раstra ИК-изображения.

Сущность предлагаемой методики заключается в преобразовании изображений термограмм в изображения тепловых свойств. Этапы решения задачи преобразования представлены на рис. 1.4.

Рассмотрим этапы предлагаемой методики.

Этап 1. Постановка прямой задачи теплопроводности (ПЗТ). На поверхности грунта с известными тепловыми свойствами (температуропроводностью a_1 , теплопроводностью λ_1) совместно выполняются граничные условия II и III рода (рис. 1.5). На глубине μ находится СПО с геометрическими размерами, не превышающими Δx_i ($i = 1, 2$), ТС объекта известны и равны a_2, λ_2 , при этом для СПО и грунта справедливы граничные условия сопряжения (граничные условия IV рода).

Требуется найти решение нелинейной сопряженной задачи вида [34]:

$$\frac{dT_j}{d\tau} = \sum_{i=1}^3 \frac{d}{dx_i} \left(a_j(T) \frac{dT_j}{dx_i} \right), \quad j = 1, 2 \quad (1.8)$$

с краевым условием

$$-\lambda_1(T) \frac{\partial T_1}{\partial x_3} \Big|_{x_3=0} - \alpha(T) T_{II} = -q(\tau), \quad (1.9)$$

где T_{II} – температура поверхности грунта; α – коэффициент теплоотдачи; q – плотность теплового потока;



Рис. 1.4. Этапы методики обработки изображений в ИК-диапазоне волн

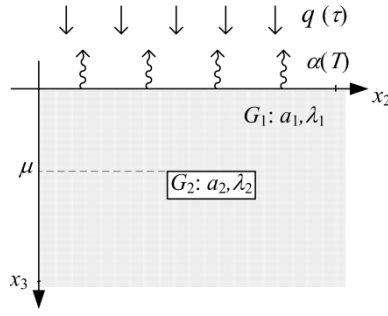


Рис. 1.5. Тепловая модель задачи

условием сопряжения

$$\lambda_1(T) \frac{\partial T_1}{\partial x_i} \Big|_{S_i} = \lambda_2(T) \frac{\partial T_2}{\partial x_i} \Big|_{S_i}; \quad (1.10)$$

$$T_1|_{S_i} = T_2|_{S_i},$$

где S_i – контактные поверхности СПО с грунтом по соответствующим осям, ограничивающие область грунта G_1 ($T_1 \in G_1$) и область СПО G_2 ($T_2 \in G_2$);
и начальными условиями

$$T_j(\tau = 0) = 0. \quad (1.11)$$

Этап 2. Численное решение ПЗТ методом конечных разностей. Рассматриваемая концепция преобразования изображений термограмм в изображения ТС заключается в постановке ПЗТ и задач оптимизации. Разработка математической модели ПЗТ необходима потому, что на ее основе ставится задача оптимизации и, в частности, задача параметрической оптимизации. Выбор метода решения оптимизационной задачи существенно зависит от формы математической модели ПЗТ. В случае простой аналитической зависимости ММ ПЗТ задача оптимизации решается косвенными методами, однако даже для одномерной ПЗТ не так просто получить аналитическое решение. Поэтому наиболее универсальным способом исследования физических моделей является применение численных методов для нахождения приближенного решения поставленной задачи [14].

Основные уравнения процесса теплопроводности и выражения для граничных условий I – IV родов приведены в многочисленных монографиях и учебниках по теплообмену [2, 14, 18, 22 – 29, 36 – 43]. Численные методы решения ПЗТ разрабатывали А.Л. Бухгейм, А.Б. Бакушинский, А.В. Гончарский, А.В. Лыков, Г.И. Марчук, А.А. Самарский, П.Н. Вабишевич, Л.А. Коздоба, В.С. Зарубин, Г.Н. Дульнев, О.Н. Будадин, С.П. Курдюмов, Г.Г. Малинецкий и др. Непосредственно методы решения коэффициентных ОЗТ методами регуляризации исследовали А.А. Самарский, П.Н. Вабишевич, Л.А. Коздоба, О.М. Алифанов, О.Н. Будадин, М.Х. Хайрулин, G. Chavent, С. Kravaris, J.H. Seinfeld, Д.М. Валишина, М.Н. Муратов, В.П. Вавилов и др.

Численное решение задачи (1.8) с краевыми условиями (1.9) – (1.11) будем искать приближенным методом конечных разностей.

Разностная аппроксимация (1.8) по оси n_i , $i = 1, 2, 3$, имеет вид [44]:

$$\frac{T_{n_i}^k - T_{n_i}^{k-1}}{\Delta \tau} = \sum_{i=1}^3 \Lambda_{ii} (\eta T_{n_i}^k + (1 - \eta) T_{n_i}^{k-1}), \quad (1.12)$$

где $\Lambda_{ii} T_{n_i}^k = a(T_{n_i}^k) \frac{T_{n_i-1}^k + 2T_{n_i}^k + T_{n_i+1}^k}{\Delta x_i^2}$; Λ_{ii} – разностный оператор; η – весовой коэффициент, $\eta = 0$ (явная схема), $\eta \neq 0$ (неявная схема Кранка – Николсона).

Для решения многомерной нелинейной задачи (1.8) на основе явной разностной схемы ($\eta = 0$) запишем (1.12) в следующем виде:

$$\frac{T_{n_i}^k - T_{n_i}^{k-1}}{\Delta \tau} = \sum_{i=1}^3 \Lambda_{ii} T_{n_i}^k. \quad (1.13)$$

Для аппроксимации граничных условий (1.9) используем выражение [40]:

$$-\lambda_1 \left(\frac{T_{n_3}^k - T_{n_3+1}^k}{2} \right) \frac{T_{n_3}^k - T_{n_3+1}^k}{\Delta x_3} - \alpha(T_{n_3}^k) T_{n_3}^k = -q(k\Delta \tau) + \frac{\lambda_1(T_{n_3}^k) \Delta x_3}{2a_1(T_{n_3}^k)} \frac{T_{n_3}^{k+1} - T_{n_3+1}^k}{\Delta \tau}, \quad (1.14)$$

где

$$q(\tau) = \begin{cases} \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\beta_1}\right)\right] E, & \tau \leq \tau^*; \\ \exp\left(-\frac{\tau - \tau^*}{\beta_2}\right) E, & \tau > \tau^*; \end{cases} \quad (1.15)$$

β_1, β_2 – параметры релаксации теплового потока на стадии нагрева и остывания, соответственно; E – энергетическая светимость ИК-излучателя; τ^* – время теплового воздействия.

Граничные условия (1.10) аппроксимируем выражением [40]:

$$T_{n_i}^k = \frac{\lambda_2(T_{n_{i-1}}^k)}{\lambda_1(T_{n_{i+1}}^k) + \lambda_2(T_{n_{i-1}}^k)} T_{n_{i-1}}^k + \frac{\lambda_1(T_{n_{i+1}}^k)}{\lambda_1(T_{n_{i+1}}^k) + \lambda_2(T_{n_{i-1}}^k)} T_{n_{i+1}}^k. \quad (1.16)$$

Представим зависимости ТС и коэффициента теплоотдачи от температуры, используя линейную комбинацию известных функций в виде:

$$\begin{aligned} a(T_{n_i}^k) &= \sum_{j=1}^p a_j \varphi_{1j}(T_{n_i}^k); \\ \lambda(T_{n_i}^k) &= \sum_{j=1}^p \lambda_j \varphi_{2j}(T_{n_i}^k); \\ \alpha(T_{n_i}^k) &= \sum_{j=1}^p \alpha_j \varphi_{3j}(T_{n_i}^k), \end{aligned} \quad (1.17)$$

где $m = 1, 2; p$ – количество интервалов аппроксимации.

В качестве $\varphi_j(\cdot)$ выберем линейные функции, тогда выражения (1.17) на основе результатов, полученных в [30, 34], примут вид:

– для $p = 3$

$$a_1(T) = \begin{cases} \tilde{a}_1(1 + TK_{1a}), & T < T_1; \\ \tilde{a}_1(1 + T_1(K_{1a} - K_{2a}) + K_{2a}T), & T_1 < T \leq T_2; \\ \tilde{a}_1(1 + T_1(K_{1a} - K_{2a}) + T_2(K_{2a} - K_{3a}) + K_{3a}T), & T > T_2, \end{cases} \quad (1.18)$$

$$\lambda_1(T) = \begin{cases} \tilde{\lambda}_1(1 + TK_{1\lambda}), & T < T_1; \\ \tilde{\lambda}_1(1 + T_1(K_{1\lambda} - K_{2\lambda}) + K_{2\lambda}T), & T_1 < T \leq T_2; \\ \tilde{\lambda}_1(1 + T_1(K_{1\lambda} - K_{2\lambda}) + T_2(K_{2\lambda} - K_{3\lambda}) + K_{3\lambda}T), & T > T_2, \end{cases} \quad (1.19)$$

– для $p = 1$

$$a_2(T) = \tilde{a}_2(1 + K_a T); \quad \lambda_2(T) = \tilde{\lambda}_2(1 + K_\lambda T); \quad \alpha(T) = \tilde{\alpha}(1 + K_a T), \quad (1.20)$$

где избыточные температуры $T_1 = 50$ К; $T_2 = 80$ К; K_j – параметры линейной зависимости ТС или теплоотдачи от температуры ($j = \overline{1, 3}$); $\tilde{a}, \tilde{\lambda}, \tilde{\alpha}$ – значения ТС и коэффициент теплоотдачи при равенстве избыточной температуры нулю (ниже, для упрощения записи, знак «тильда» опущен).

Используя метод прогонки для приближенных выражений (1.13) – (1.20), получим численное решение задачи (1.8) с крайними условиями (1.9) – (1.11), которое в общем виде запишем, переписав верхний индекс времени k в скобки, в виде:

$$T(n_1, n_2, n_3, k; \Psi_1, \dots, \Psi_{\Pi}), \quad (1.21)$$

параметры которого представлены в табл. 1.2.

Параметры $\psi_1, \dots, \psi_M, M = 2$ и $\psi_{\Pi-2}, \dots, \psi_{\Pi}, \Pi = 18$ отражают ТС грунта, СПО и глубины его залегания, и в постановке ПЗТ считаются известными. Запись с использованием переменных $M < \Pi$ сделана специально для подчеркивания возможности изменения их количественных значений в той или иной реализации численной модели.

1.2. Вводимые параметры

ψ_i	Обозначение	Физический смысл	Размерность
ψ_1	a_1	Температуропроводность грунта при равенстве избыточной температуры 0 К	$\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$
ψ_2	λ_1	Теплопроводность грунта при равенстве избыточной температуры 0 К	$\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$
ψ_3	K_{1a}	Параметр линейной зависимости a_1 от T на интервале избыточных температур $0 \leq T \leq 50$ К	К^{-1}
ψ_4	K_{2a}	Параметр линейной зависимости a_1 от T на интервале избыточных	К^{-1}

		температур $50 \leq T \leq 80$ К	
ψ_5	K_{3a}	Параметр линейной зависимости a_1 от T на интервале избыточных температур $T > 80$ К	K^{-1}
ψ_6	$K_{1\lambda}$	Параметр линейной зависимости λ_1 от T на интервале избыточных температур $0 \leq T \leq 50$ К	K^{-1}
ψ_7	$K_{2\lambda}$	Параметр линейной зависимости λ_1 от T на интервале избыточных температур $50 \leq T \leq 80$ К	K^{-1}
ψ_8	$K_{3\lambda}$	Параметр линейной зависимости λ_1 от T на интервале избыточных температур $T > 80$ К	K^{-1}
ψ_9	α	Коэффициент теплоотдачи	$Вт \cdot м^{-2} \cdot К^{-1}$
ψ_{10}	K_α	Параметр линейной зависимости α от T	K^{-1}
ψ_{11}	K_a	Параметр линейной зависимости a_2 от T	K^{-1}
ψ_{12}	K_λ	Параметр линейной зависимости λ_2 от T	K^{-1}
ψ_{13}	$q, (E)$	Плотность теплового потока (энергетическая светимость)	$Вт \cdot м^{-2}$
ψ_{14}	β_1	Постоянная релаксации теплового потока на стадии нагрева	с
ψ_{15}	β_2	Постоянная релаксации теплового потока на стадии остывания	с
ψ_{16}	$\psi_{\Pi-2} = a_2$	Температуропроводность СПО при равенстве избыточной температуры 0 К	$м^2 \cdot с^{-1}$
ψ_{17}	$\psi_{\Pi-1} = \lambda_2$	Теплопроводность СПО при равенстве избыточной температуры 0 К	$Вт \cdot м^{-1} \cdot К^{-1}$
ψ_{18}	$\psi_{\Pi} = \mu$	Глубина залегания СПО минимальных размеров (Δx^3)	м

Этап 3. Постановка задачи оптимизации. Значение «истинной» функции $\tilde{T}(n_1, n_2, k)$ известно с некоторой ошибкой ТПВП δ из-за вносимой им инструментальной погрешности измерений. Ошибка аппроксимации (1.21) есть функция от $\psi_1, \dots, \psi_{\Pi}$:

$$\Delta(n_1, n_2, k; \psi_1, \dots, \psi_{\Pi}) = |T(n_1, n_2, k; \psi_1, \dots, \psi_{\Pi}) - \tilde{T}(n_1, n_2, k)| + \delta, \quad (1.22)$$

где $T(n_1, n_2, k; \psi_1, \dots, \psi_{\Pi})$ – избыточная температура, рассчитанная по дискретной модели (ДМ); $\tilde{T}(n_1, n_2, k)$ – избыточная температура, измеренная ТПВП.

Для нахождения неизвестных параметров $\psi_{M+1}, \dots, \psi_{\Pi-2}$ рассмотрим многопараметрическую задачу оптимизации с квадратичным критерием [45]:

$$\left\{ J(\psi_{M+1}, \dots, \psi_{\Pi-2}) = \sum_{n_1=0}^{N_1} \sum_{n_2=0}^{N_2} \sum_{k=0}^K \Delta(n_1, n_2, k; \psi_1, \dots, \psi_{\Pi})^2 \right\} \leq \delta \quad (1.23)$$

при ограничениях $\psi_{i_{\min}} < \psi_i < \psi_{i_{\max}}$, $i \in \overline{M+1, \Pi-2}$.

Этап 4. Измерение термограмм на поверхности материалов с известными ТС. При проведении измерений известными являются следующие параметры: $\psi_1, \psi_2, \psi_{16}, \psi_{17}, \psi_{18}$, при этом функции измеренных значений избыточной температуры присвоим нижний индекс «э»: $\tilde{T}_э(n_1, n_2, k)$, подчеркивающий, что она получена по данным наблюдения СПО с известными ТС.

Этап 5. Численное решение оптимизационной задачи № 1. Неизвестные параметры $\psi_{M+1}, \dots, \psi_{\Pi-2}$ находятся на основе решения задачи идентификации. Задача (1.23) некорректна по Адамару в связи с тем, что \tilde{T} известна с ошибкой δ , и приводит к необходимости рассмотреть целевую функцию удовлетворения вида [14]:

$$\left\{ J(\Psi_{M+1}, \dots, \Psi_{\Pi-2}) = \sum_{n_1=0}^{N_1} \sum_{n_2=0}^{N_2} \sum_{k=0}^{K-1} (\Delta(n_1, n_2, k; \Psi_1, \dots, \Psi_{\Pi}))^2 + \xi \left(\frac{\Delta(n_1, n_2, k+1; \Psi_1, \dots, \Psi_{\Pi}) - \Delta(n_1, n_2, k; \Psi_1, \dots, \Psi_{\Pi})}{\Delta\tau} \right)^2 \right\} \leq \delta \quad (1.24)$$

при ограничениях $\Psi_{i_{\min}} < \Psi_i < \Psi_{i_{\max}}$ и оценке уклонения $|T - \tilde{T}| \leq \delta$ с использованием регуляризирующего параметра ξ .

Для сокращения вычислительных затрат запишем (1.24) для значений избыточных температур, усредненных по площади изображения:

$$T(k; \Psi_1, \dots, \Psi_{\Pi}) = \frac{1}{(N_1+1)(N_2+1)} \sum_{n_1=0}^{N_1} \sum_{n_2=0}^{N_2} T(n_1, n_2, k; \Psi_1, \dots, \Psi_{\Pi}); \quad (1.25)$$

$$\tilde{T}(k) = \frac{1}{(N_1+1)(N_2+1)} \sum_{n_1=0}^{N_1} \sum_{n_2=0}^{N_2} T(n_1, n_2, k). \quad (1.26)$$

Запишем (1.22) как $\bar{\Delta}(k; \Psi_1, \dots, \Psi_{\Pi}) = |T(k; \Psi_1, \dots, \Psi_{\Pi}) - \tilde{T}_3(k)| + \delta$, следовательно, функционал (1.24) примет вид

$$\left\{ J(\Psi_{M+1}, \dots, \Psi_{\Pi-2}) = \sum_{k=0}^K \bar{\Delta}(k; \Psi_1, \dots, \Psi_{\Pi})^2 + \xi \sum_{k=0}^{K-1} \left(\frac{\bar{\Delta}(k+1; \Psi_1, \dots, \Psi_{\Pi}) - \bar{\Delta}(k; \Psi_1, \dots, \Psi_{\Pi})}{\Delta\tau} \right)^2 \right\} \leq \delta \quad (1.27)$$

при ограничениях $\Psi_{i_{\min}} < \Psi_i < \Psi_{i_{\max}}$.

В результате минимизации (1.27) искомое решение будет удовлетворять неравенству

$$|T(k; \hat{\Psi}_{M+1}, \dots, \hat{\Psi}_{\Pi-2}) - \tilde{T}_3(k)| \geq \delta^* > \delta, \quad (1.28)$$

где $|\delta^* - \delta|$ – погрешность численного метода решения оптимизационной задачи (1.27); $\hat{\Psi}_{M+1}, \dots, \hat{\Psi}_{\Pi-2}$ – идентифицированные численные оценки искомых параметров ДМ.

Этапы 6, 7. Анализ полученного решения. Повышение точности и вычислительной эффективности решения поставленных задач. Анализ $\tilde{T}(k)$ позволяет выделить на графике избыточной температуры временные участки (интервалы времени) $[k_{m_1} \Delta\tau, k_{m_2} \Delta\tau], \dots, [k_{m_i} \Delta\tau, k_{m_{i+1}} \Delta\tau]$, которые позволяют учесть влияние динамической погрешности измерений $\tilde{T}(k)$ и, кроме того, снизить количество необходимых вычислений. В свою очередь, $\Psi_{M+1}, \dots, \Psi_{\Pi-2}$ могут идентифицироваться отдельно для ДМ без учета СПО и с его учетом. При этом средние значения избыточных температур (1.25) и (1.26) могут вычисляться только в области аномальных изображений СПО. Тогда \tilde{T}_3 должно иметь индекс «а»: \tilde{T}_a .

Таким образом, на выходе этапа 7 имеем численное решение задачи (1.8) с краевыми условиями (1.9) – (1.11): $T(n_1, n_2, n_3, k; \hat{\Psi}_1, \dots, \hat{\Psi}_{\Pi})$, количественные значения параметров которого известны.

Результаты анализа могут непосредственно влиять на уточнение постановки ПЗТ, численные аппроксимации и методы решения как прямой задачи, так и оптимизационной.

Этап 8. Измерение термограмм на поверхности материалов с неизвестными ТС. Воспроизведем физическую модель ПЗТ с неизвестными параметрами СПО: $\Psi_{\Pi-2}, \Psi_{\Pi-1}, \Psi_{\Pi}$ (табл. 1.2). Произведя тепловизионную съемку, получим ИК-видеоизображение $\tilde{T}(n_1, n_2, k)$, которое будет отражать в себе свойства неизвестного СПО.

Этап 9. Численное решение оптимизационной задачи № 2. Для идентификации неизвестных параметров $\Psi_{\Pi-2}, \Psi_{\Pi-1}, \Psi_{\Pi}$ СПО будем решать в каждой точке изображения (n_1, n_2) оптимизационную параметрическую задачу:

$$\left\{ J(n_1, n_2; \Psi_{\Pi-2}, \Psi_{\Pi-1}, \Psi_{\Pi}) = \sum_{k=0}^K (T(n_1, n_2, k; \hat{\Psi}_1, \dots, \hat{\Psi}_{\Pi-3}; \Psi_{\Pi-2}, \Psi_{\Pi-1}, \Psi_{\Pi}) - T(n_1, n_2, k))^2 \right\} \rightarrow \min \quad (1.29)$$

при ограничениях

$$0 > a_{\min} > \Psi_{\Pi-2} > a_{\max}; \quad 0 > \lambda_{\min} > \Psi_{\Pi-1} > \lambda_{\max}; \quad 0 \geq \Psi_{\Pi} > N_{\max}.$$

В результате решения задачи (1.29) получают численные оценки пространства изображений $\hat{\Psi}_{\Pi-i}(n_1, n_2)$, $i = 0, 1, 2$:

– $\hat{\Psi}_{\Pi-2}(n_1, n_2) = a_2(n_1, n_2)$ – тепловая томограмма (T_a), каждый пиксель которой отображает значение теплопроводности;

– $\hat{\Psi}_{\Pi-1}(n_1, n_2) = \lambda_2(n_1, n_2)$ – тепловая томограмма (T_λ), каждый пиксель которой отображает значение теплопроводности;

– $\hat{\Psi}_{\Pi}(n_1, n_2) = \mu(n_1, n_2)$ – глубинограмма (G), каждый пиксель которой отображает значение глубины залегания

СПО размером, не превышающим $\Delta x_i, i = 1, 2$.

Этап 10. Обработка полученных данных. Глубинограмма $\mu(n_1, n_2)$ имеет особое значение, по сути, это матрица решений об обнаружении элементов СПО. Если в некоторой точке (n_1, n_2) $\mu = 0$, это значит, что на любой глубине $\Delta x_3 n_3, n_3 = 0, 1, \dots, N_3$ элемент СПО отсутствует, и наоборот, при $\mu > 0$ значение глубинограммы отображает количество отсчетов n_3 до элемента СПО относительно поверхности грунта (рис. 1.6).

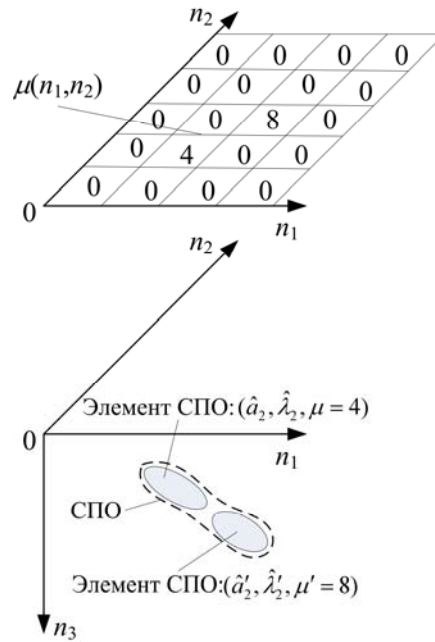


Рис. 1.6. Отображение глубинограммы G

Формирование 3D-изображения. Трехмерное изображение множества элементов СПО $\Theta(n_1, n_2, n_3)$ можно получить на основе решения неравенств:

– по температуропроводности

$$\Theta_a(n_1, n_2, n_3) = \begin{cases} a_2(n_1, n_2, \mu) & \text{при } \mu(n_1, n_2) > 0; \\ a_1(n_1, n_2, n_3) & \text{при } \mu(n_1, n_2) = 0; \end{cases} \quad (1.30)$$

– по теплопроводности

$$\Theta_\lambda(n_1, n_2, n_3) = \begin{cases} \lambda_2(n_1, n_2, \mu) & \text{при } \mu(n_1, n_2) > 0; \\ \lambda_1(n_1, n_2, n_3) & \text{при } \mu(n_1, n_2) = 0. \end{cases} \quad (1.31)$$

Определяющим параметром для построения 3D-изображения (тепловой томограммы) местоположения элементов СПО в грунте является теплопроводность.

Обнаружение СПО методом сравнения эталонного изображения и глубинограммы. Воспользуемся мерой различия [35]

$$D(i, j) = \sum_{n_1=0}^{N_1} \sum_{n_2=0}^{N_2} (\mu(n_1, n_2) - F(n_1 - i, n_2 - j))^2 < L_D, \quad (1.32)$$

где F – матрица эталонного изображения (рис. 1.7) размерами $(N_1^* - n_1^*) \times (N_2^* - n_2^*)$; L_D – порог принятия решения.

Используя ступенчатую функцию $h(x)$ для преобразования изображения G в однобитное, (1.28), запишем:

$$D(i, j) = \sum_{n_1=0}^{N_1} \sum_{n_2=0}^{N_2} [h(\mu(n_1, n_2) - 1) - F^*(n_1 - i, n_2 - j)] < L_D, \quad (1.33)$$

где F^* – однобитовая матрица эталонного изображения.

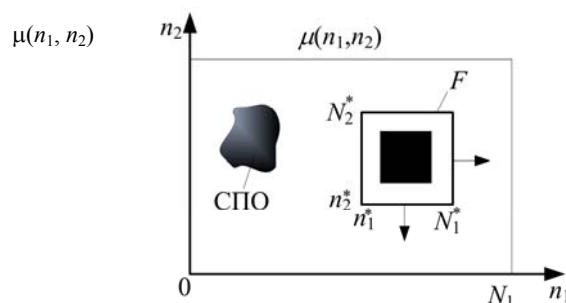


Рис. 1.7. Обнаружение СПО методом сравнения G с эталонным изображением

Расчет меры различия, согласно (1.33), позволяет снизить количество вычислений и объем памяти, выделяемой на хранение эталонных изображений.

В качестве меры различия целесообразно использовать взаимную корреляцию между изображениями. Корреляционный метод более надежен, однако требует значительно большего объема вычислений. Но при обработке бинарных изображений в результате применения функции $h(x)$ это не столь существенно, поскольку перемножение однобитовых чисел сводится к простой логической операции «И».

Распознавание класса СПО по его ТС. Обнаруженный по его форме объект, согласно (1.33), можно классифицировать по идентифицированным значениям соответствующих ТС. Например, для классификации СПО по $\lambda_2(n_1, n_2)$ необходимо вычислить среднее значение теплопроводности:

$$\bar{\lambda}_2 = \frac{1}{(N_1^* - n_1^*)(N_2^* - n_2^*)} \sum_{n_1=n_1^*}^{N_1^*} \sum_{n_2=n_2^*}^{N_2^*} \lambda_2(n_1, n_2),$$

после чего сравнить со шкалой ТС материалов (рис. 1.8).

При $\bar{\lambda}_2 > \lambda_{\Pi_2}$ принимается решение о принадлежности обнаруженного СПО к классу теплопроводников (металл), если $\bar{\lambda}_2 < \lambda_{\Pi_1}$, то к классу теплоизоляторов (пластмасса). Если $\lambda_{\Pi_1} \leq \bar{\lambda}_2 \leq \lambda_{\Pi_2}$, то будет иметь место ошибка обнаружения первого рода.

Задача обнаружения и распознавания СПО с размерами, не превышающими Δx_i ($i = 1, 2$), решается, используя только изображение $\lambda_2(n_1, n_2)$. Зададим значения порогов согласно выражениям:

$$\lambda_{\Pi_1} = \bar{\lambda}_2 - \sigma_{\lambda_2} K_{\Pi}; \quad \lambda_{\Pi_2} = \bar{\lambda}_2 + \sigma_{\lambda_2} K_{\Pi}, \quad (1.34)$$

где $K_{\Pi} \in (0, 3]$.



Рис. 1.8. Шкала классификации материалов по теплопроводности

Рассчитаем значение рассогласования

$$\Delta D_{\lambda}(n_1, n_2) = |\lambda_2(n_1, n_2) - \bar{\lambda}_1|. \quad (1.35)$$

Принятие решения об обнаружении и распознавание класса СПО произведем на основе выполнения неравенств:

$$D_{\lambda}(n_1, n_2) = \begin{cases} 0, & \Delta D_{\lambda}(n_1, n_2) \leq 0,5(\lambda_{\Pi_2} - \lambda_{\Pi_1}); \\ 1, & \Delta D_{\lambda}(n_1, n_2) > 0,5(\lambda_{\Pi_2} - \lambda_{\Pi_1}) \wedge (\lambda_2(n_1, n_2) > \lambda_{\Pi_2}); \\ 2, & \Delta D_{\lambda}(n_1, n_2) > 0,5(\lambda_{\Pi_2} - \lambda_{\Pi_1}) \wedge (\lambda_2(n_1, n_2) < \lambda_{\Pi_1}), \end{cases} \quad (1.36)$$

где $D_{\lambda}(n_1, n_2) = 0$ обозначает, что СПО в точке (n_1, n_2) не обнаружен и соответственно это материал класса «грунт»; $D_{\lambda}(n_1, n_2) = 1$ – в точке (n_1, n_2) обнаружен СПО (элемент СПО) класса «металл»; $D_{\lambda}(n_1, n_2) = 2$ – в точке (n_1, n_2) обнаружен СПО (элемент СПО) класса «пластмасса».

Значения порогов (1.34) задаются на основании табличных значений ТС известных материалов: грунт, песок, глина, асфальт, гравий и другие.

Предлагаемая методика обработки ИК-изображений на основе идентификации ТС позволяет повысить контраст изображения на порядок по сравнению с контрастом изображений термограмм [46, 47]. При этом пороговое значение λ_{Π} сигнала обнаружения в несколько десятков раз отличается от среднего значения сигнала фона $\bar{\lambda}$. Так, теплопроводность металлов составляет $(15...350) \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, пластмасс $(0,05...0,1) \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, что на один – два порядка больше (меньше) теплопроводности грунта $(0,8...1,2) \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$.

2. ДИСКРЕТНЫЕ МОДЕЛИ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ С РАЗРЫВНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ И ВНУТРЕННИМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛА

Прикладные проблемы контроля производства и эксплуатации теплоизоляционных материалов в системах жизнеобеспечения, а также фундаментальная проблема применения тепловой дефектоскопии и томографии приводят к необходимости решения краевой задачи для параболических уравнений численными методами, основанными на принципах вычислительной теплофизики [24]. Одним из подходов к численному решению нелинейной задачи теплопроводности является применение двух- и трехслойных разностных схем с аппроксимацией зависимостей ТС в виде линейной или кусочно-линейной функции. Рассмотрим данные схемы с учетом принципов, описанных в главе 1.

2.1. ДВУМЕРНАЯ НЕЛИНЕЙНАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ ИЗОТРОПНОЙ СРЕДЫ

Для численной аппроксимации граничных условий сопряжения (1.10) рассмотрим двумерный случай задачи (1.8), когда два полуограниченных материала с различными ТС (теплопроводность λ_1 , температуропроводность a_1 одного – в области $x_3 > 0$ и λ_2, a_2 другого – в области $x_3 < 0$) приведены в контакт, плоскость сопряжения $x_3 = 0$ [38, 48, 49]. Запишем граничные условия в следующем виде:

$$\begin{aligned} \lambda_2(T) \frac{\partial T_2}{\partial x_3} \Big|_{x_3=0-} &= \alpha_S (T_1|_{x_3=0+} - T_2|_{x_3=0-}); \\ \lambda_1(T) \frac{\partial T_1}{\partial x_3} \Big|_{x_3=0+} - \lambda_2(T) \frac{\partial T_2}{\partial x_3} \Big|_{x_3=0-} &= q(\tau), \end{aligned}$$

где α_S – контактное термическое сопротивление (КТС).

Для численного решения введем сеточную функцию $T_{m,n}^k$, где m – номер отсчета по координате x_2 ; n – номер отсчета по координате x_3 ; k – номер отсчета по времени; Δx – шаг сетки по расстоянию; $\Delta \tau$ – шаг сетки по времени.

Разностная схема для двумерного уравнения теплопроводности имеет вид [44]

$$T_{m,n}^{k+1} = \left(1 - \frac{4\Delta\tau a_{1,2}(T_{m,n}^k)}{\Delta x^2} \right) T_{m,n}^k + \frac{\Delta\tau}{\Delta x^2} a_i(T_{m\pm 1,n\pm 1}^k) T_{m\pm 1,n\pm 1}^k,$$

где

$$\begin{aligned} a_i(T_{m\pm 1,n\pm 1}^k) T_{m\pm 1,n\pm 1}^k &= a_i(T_{m-1,n}^k) T_{m-1,n}^k + a_i(T_{m+1,n}^k) T_{m+1,n}^k + \\ &+ a_i(T_{m,n-1}^k) T_{m,n-1}^k + a_i(T_{m,n+1}^k) T_{m,n+1}^k, \quad i = 1, 2. \end{aligned}$$

Для получения при численном решении физически оправданных результатов следует соблюдать условие сходимости вычислений [44]:

$$\Delta\tau a_{\min} \leq \frac{\Delta x^3}{2}.$$

В случае идеального теплового контакта и отсутствия источника тепла условие сопряжения записывается как [39]

$$\lambda_1(T) \frac{\partial T_1}{\partial x_3} \Big|_{x_3=0+} = \lambda_2(T) \frac{\partial T_2}{\partial x_3} \Big|_{x_3=0-}; \quad (2.1)$$

$$T_1|_{x_3=0+} = T_2|_{x_3=0-}. \quad (2.2)$$

Рассмотрим разностную схему, для которой установим границы объемов на расстоянии ξ между расчетным узлом N . Используя левое конечное разностное отношение, получаем:

$$\lambda_2(T_{N-1}^k) \frac{T_{-N}^k - T_{N-1}^k}{\Delta x - \xi} = \lambda_1(T_{N+1}^k) \frac{T_{N+1}^k - T_{+N}^k}{\Delta x - \xi}.$$

На основании (2.2) $T_{-N}^k = T_{+N}^k = T_N^k$ при $\xi \rightarrow 0$. В итоге разностная схема примет вид [40, 44]:

$$T_N^k = \frac{\lambda_2(T_{N-1}^k)}{\lambda_1(T_{N+1}^k) + \lambda_2(T_{N-1}^k)} T_{N-1}^k + \frac{\lambda_1(T_{N+1}^k)}{\lambda_1(T_{N+1}^k) + \lambda_2(T_{N-1}^k)} T_{N+1}^k.$$

В случае неидеального теплового контакта условие сопряжения (2.2) изменится [39]:

$$\lambda_2(T) \frac{\partial T_2}{\partial x_3} \Big|_{x_3=0-} = \alpha_S (T_1|_{x_3=0+} - T_2|_{x_3=0-}).$$

Таким образом, при $\xi \rightarrow 0$ в точке N имеем разрыв первого рода. В реальных измерениях в точке N находится термомпара. Полагая, что абсолютная температура в плоскости контакта между точками $-N$ и $+N$ изменяется по линейному закону, записываем систему:

$$\begin{cases} \lambda_2(T_{N-1}^k) \frac{T_{-N}^k - T_{N-1}^k}{\Delta x - \xi} = \lambda_1(T_{N+1}^k) \frac{T_{N+1}^k - T_{N+}^k}{\Delta x - \xi}; \\ \lambda_2(T_{N-1}^k) \frac{T_{-N}^k - T_{N-1}^k}{\Delta x - \xi} = \alpha_S (T_{+N}^k - T_{-N}^k); \\ T_N^k = \frac{1}{2} (T_{+N}^k + T_{-N}^k). \end{cases}$$

При $\xi \rightarrow 0$ решение будет иметь вид

$$\begin{aligned} T_N^k = & \left[2(\alpha_S \Delta x \lambda_1(T_{N+1}^k) + \lambda_1(T_{N+1}^k) \lambda_2(T_{N-1}^k) + \alpha_S \Delta x \lambda_2(T_{N-1}^k)) \right]^{-1} \times \\ & \times \left[(2\alpha_S \Delta x \lambda_2(T_{N-1}^k) + \lambda_1(T_{N+1}^k) \lambda_2(T_{N-1}^k)) T_{N-1}^k + \right. \\ & \left. + (2\alpha_S \Delta x \lambda_1(T_{N+1}^k) + \lambda_1(T_{N+1}^k) \lambda_2(T_{N-1}^k)) T_{N+1}^k \right]. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Таким образом, для учета влияния КТС на изменение температуры в плоскости контакта двух материалов целесообразно пользоваться конечно-разностным уравнением (2.3).

Однако результаты математического моделирования и натурального эксперимента разнятся из-за релаксации теплового потока. Так, в работе [50] предложено использовать уравнение теплопроводности гиперболического типа, в связи с чем функция источника тепла аппроксимируется выражением (1.15) или его частным случаем:

$$q(x_1, x_3, \tau) = \begin{cases} q, \tau \leq \tau^*; \\ q \exp\left\{-(\tau - \tau^*)/\beta\right\}, \tau > \tau^*, \end{cases} \quad (2.4)$$

где τ^* – длительность теплового импульса.

В [41, 51] показано, что для решения инженерных задач нелинейной теплопроводности зависимости $\lambda(T)$, $a(T)$ с высокой степенью достоверности аппроксимируются линейной функцией вида (1.20). В расчетах по двумерной модели приняты зависимости ТС и КТС от температуры согласно (1.20).

2.2. АЛГОРИТМ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ДВУМЕРНОЙ МОДЕЛИ

Структура алгоритма расчета двумерной задачи состоит в организации счета внутри цикла по времени. Каждый шаг по времени состоит из двух частей, в которых проводится прогонка по какому-либо одному направлению. Расчет сеточной модели производится в пространственной сетке размерами $2N \times 2M$. Импульсный источник тепла находится в точке с координатами $\{N, M\}$. Зона контакта двух материалов описывается уравнением $z = N$. Используя условие симметрии, прогонки можно произвести по оси r в точках $\overline{M}, \overline{2M-1}$, по оси z в точках $\overline{1}, \overline{2N-1}$.

Алгоритм расчета с учетом зависимости (1.20) имеет этапы, представленные в [48].

Шаг 1. Используем начальное условие $T_1|_{\tau=0} = T_2|_{\tau=0} = 0$.

Шаг 2. Для каждой итерации по времени для расчета разностного решения $T_{m,n}^k$ сначала вычисляем промежуточную сеточную функцию

$$\begin{aligned} T_{M,N}^k &= \frac{q}{\lambda_1(1 + K_\lambda T_{M,N}^k) + \lambda_2(1 + K_\lambda T_{M,N}^k)} \quad \text{при } \tau \leq \tau^*; \\ T_{M,N}^k &= \frac{q \exp\left(-\frac{k\Delta\tau - \tau^*}{\beta}\right)}{\lambda_1(1 + K_\lambda T_{M,N}^k) + \lambda_2(1 + K_\lambda T_{M,N}^k)} \quad \text{при } \tau > \tau^*. \end{aligned}$$

Шаг 3. Используем уравнения для искомой сеточной функции $T_{m,n}^{k+1}$ «прогонками вдоль осей x_2, x_3 », соответствующей температуре на $(k+1)$ -м временном слое:

$$T_{m,n}^{k+1} = \left(1 - \frac{4\Delta\tau a_i(1 + K_a T_{m,n}^k)}{\Delta x^2} \right) T_{m,n}^k + \frac{\Delta\tau}{\Delta x^2} a_i(1 + K_a T_{m\pm 1, n\pm 1}^k) T_{m\pm 1, n\pm 1}^k$$

при $m = \overline{1}, \overline{2M-1}$, $n = \overline{N+1}, \overline{2N-1}$; $m = \overline{1}, \overline{2M-1}$, $n = \overline{N-1}, \overline{1}$, $i = 1, 2$.

Шаг 4. Определяем температурное поле в плоскости контакта:

$$T_{m,N}^{k+1} = \frac{\{2\alpha_S \Delta x \lambda_1 (1 + K_\lambda T_{m,N+1}^{k+1}) + \dots\}}{2\{\alpha_S \Delta x \lambda_1 (1 + K_\lambda T_{m,N+1}^{k+1}) + \lambda_1 (1 + K_\lambda T_{m,N+1}^{k+1}) \lambda_2 (1 + K_\lambda T_{m,N-1}^{k+1}) + \dots\}} \rightarrow \dots$$

$$\dots \rightarrow \frac{+ \lambda_1 (1 + K_\lambda T_{m,N+1}^{k+1}) \lambda_2 (1 + K_\lambda T_{m,N+1}^{k+1}) \{T_{m,N+1}^{k+1} + \dots\}}{+ \alpha_S \Delta x \lambda_2 (1 + K_\lambda T_{m,N-1}^{k+1}) \{T_{m,N+1}^{k+1} + \dots\}} +$$

$$+ \frac{\{2\alpha_S \Delta x \lambda_2 (1 + K_\lambda T_{m,N-1}^{k+1}) + \dots\}}{2\{\alpha_S \Delta x \lambda_1 (1 + K_\lambda T_{m,N+1}^{k+1}) + \lambda_1 (1 + K_\lambda T_{m,N+1}^{k+1}) \lambda_2 (1 + K_\lambda T_{m,N-1}^{k+1}) + \dots\}} \rightarrow \dots$$

$$\dots \rightarrow \frac{+ \lambda_1 (1 + K_\lambda T_{m,N-1}^{k+1}) \lambda_2 (1 + K_\lambda T_{m,N-1}^{k+1}) \{T_{m,N-1}^{k+1} + \dots\}}{+ \alpha_S \Delta x \lambda_2 (1 + K_\lambda T_{m,N-1}^{k+1}) \{T_{m,N-1}^{k+1} + \dots\}}$$

при $m = \overline{1, 2M-1}$.

Шаги 2 – 4 повторяются для $k = 1, 2, \dots, K$.

Данный алгоритм реализован в виде Dynamic Linked Library (DLL) для использования в математической среде MathCAD в виде функции Boer2D(.). Полный текст программы Boer2D.c приведен в прил. А.

Входные данные специализированной функции Boer2D(.) [52, 53]:

$$\text{Boer } 2D \left(\begin{pmatrix} a_1 & \lambda_1 \\ a_2 & \lambda_2 \\ K_a & K_\lambda \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} N & \tau^* \\ K & q \\ \Delta x & \alpha_S \\ d & v \\ \Delta \tau & \beta \end{pmatrix} \right),$$

где d – резервная переменная; v – сдвиг координаты точки контроля температуры; q – количество теплоты за время $\Delta \tau$ через площадь $\Delta x \times \Delta x$ пространственной сетки (рис. 2.1), Вт · м⁻².

Выходные данные:

1. Значение параметра $v \geq 0$. Функция Boer2D(.) генерирует двумерный массив значений температуры в точке $\{M + v, N\}$ в зависимости от времени

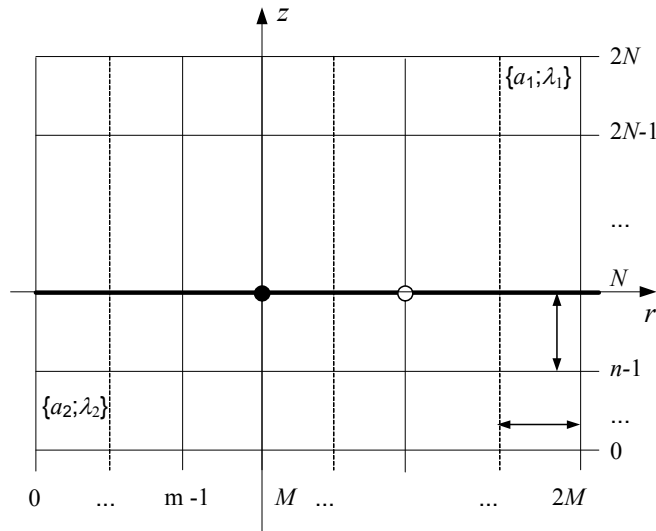


Рис. 2.1. Пространственная сетка математической модели

$$\begin{pmatrix} 0 & T(0) \\ \Delta \tau & T(\Delta \tau) \\ 2\Delta \tau & T(2\Delta \tau) \\ \dots & \dots \\ K\Delta \tau & T(K\Delta \tau) \end{pmatrix}. \quad (2.5)$$

2. Значение параметра $v < 0$. Функция Boer2D(.) генерирует двумерный массив значений температуры в пространстве в момент времени $K\Delta \tau$ вида

$$\begin{pmatrix} T(0, 0) & T(1, 0) & \dots & T(2M, 0) \\ T(0, 1) & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ T(0, 2N) & \dots & \dots & T(2M, 2N) \end{pmatrix}. \quad (2.6)$$

Массив $T(0, N) \dots T(2M, N)$ определяет значения температуры в плоскости контакта. Так, на рис. 2.2, а, б представлены графики изотерм для материалов КВ – КССБ и рипор 2Н – КССБ.

Разработанная функция $\text{Boer2D}()$ позволяет решить прямую задачу теплопроводности в двумерном пространстве.

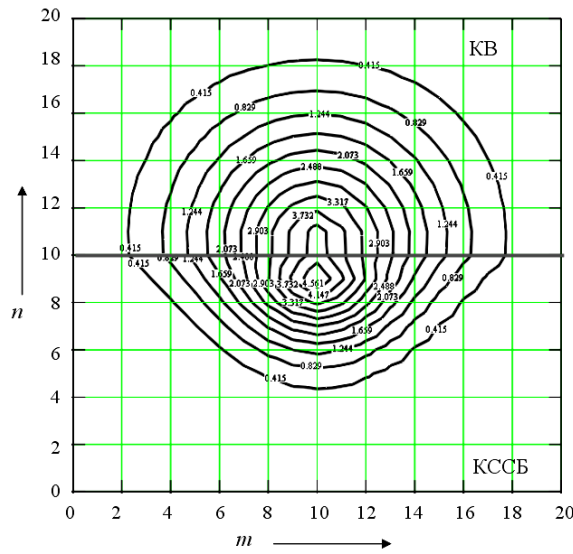
2.3. ПРАКТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ПО ДВУМЕРНОЙ МОДЕЛИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

В ходе исследовательской работы было изготовлено средство технического диагностирования ТС материалов [48, 54].

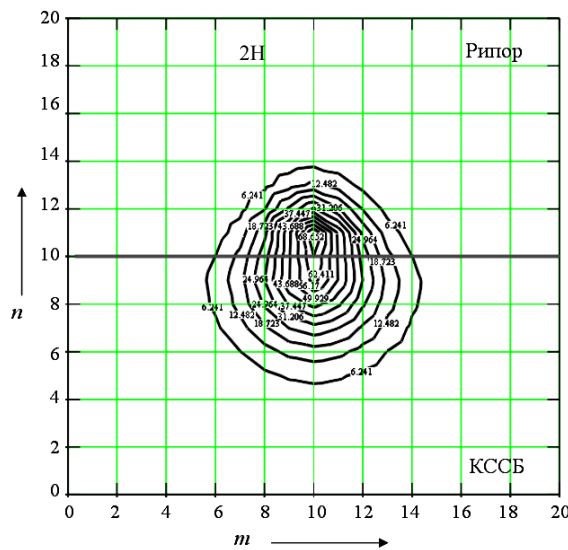
В качестве подложки – эталона используется материал кремнеземное связующее бетонит (КССБ), измерение температуры производится с помощью термопар хромель-копель, сваренной в стык на расстоянии 1,64 мм от нагревателя, микропровод нагревателя выполнен из нихрома. По результатам натурных экспериментов, при тех же параметрах физической модели, получены данные по измерению температуры в точке контроля $r = 1,64 \cdot 10^{-3}$ м, $a_2 = 8,3 \cdot 10^{-7}$ м² · с⁻¹;

$\lambda_2 = 1,337$ Вт · м⁻¹ · К⁻¹ (кварцевое стекло КВ) и $a_2 = 3,5 \cdot 10^{-7}$ м² · с⁻¹; $\lambda_2 = 0,026$ Вт · м⁻¹ · К⁻¹ (рипор 2Н); $a_1 = 2,92 \cdot 10^{-7}$ м² · с⁻¹; $\lambda_1 = 0,05$ Вт · м⁻¹ · К⁻¹ (КССБ); $\Delta\tau = 545 \cdot 10^{-6}$ м; $\Delta\tau = 10$ мс; $\tau^* = 250$ мс; $K_a = -2 \cdot 10^{-4}$ К⁻¹; $K_\lambda = 24 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹; $\beta = 0,9$ с; $N = M = 10$.

На рис. 2.3, а, б приведены графики изменения избыточной температуры T от времени τ , полученные экспериментально и рассчитанные с помощью двумерной сеточной модели при исследовании рипора 2Н (кривая 1) и кварцевого стекла КВ (кривая 2), скорость изменения избыточной температуры (кривая 3), I – интегральная температура от момента времени 1 с до заданного τ_0 .



а)



б)

Рис. 2.2. Изотермы в момент времени $\tau = 4,5$ с для материалов КВ – КССБ (а) и рипор 2Н – КССБ (б)

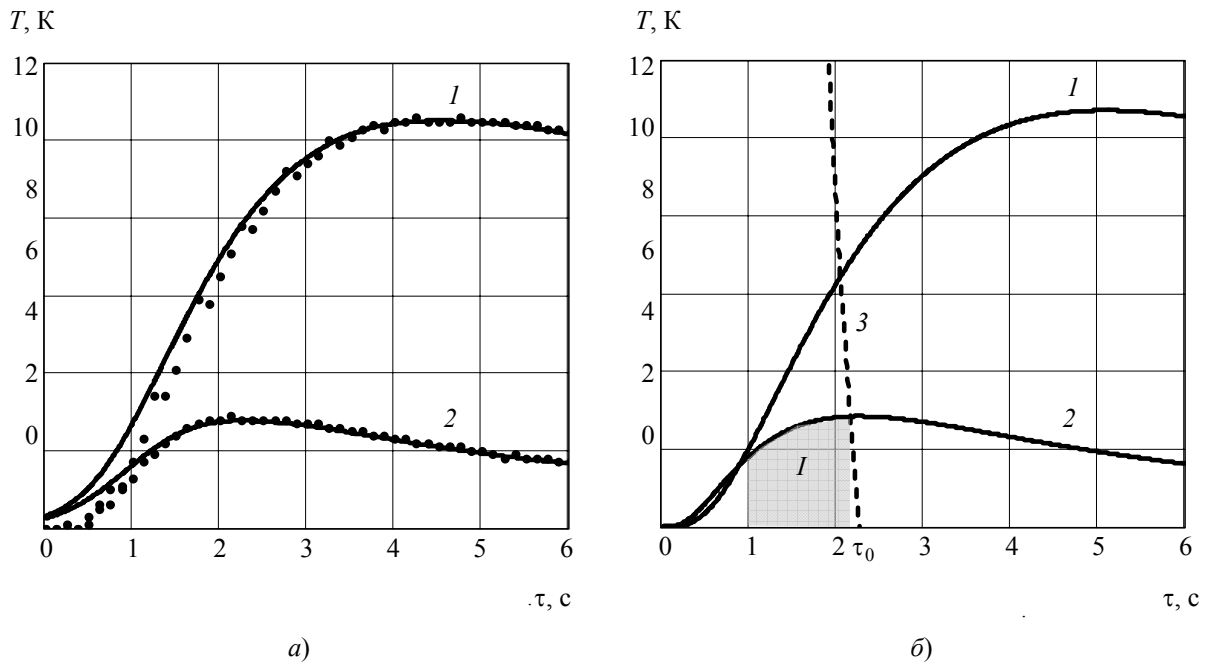


Рис. 2.3. Графики изменения избыточной температуры

После фильтрации измерительного сигнала и замены экспериментальных точек кубической сплайн-интерполированной функцией, среднеквадратичное отклонение моделирования методом конечных разностей (МКР) и натурального эксперимента на интервале времени $\bar{1}, \bar{6}$ с составило 8,4 и 4,2 %, соответственно.

2.4. ТРЕХМЕРНАЯ НЕЛИНЕЙНАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ ИЗОТРОПНОЙ СРЕДЫ

Рассмотрим задачу п. 2.3 в трехмерном пространстве с учетом расположения линейного источника тепла в плоскости контакта параллельно датчику температуры (рис. 2.4) [30].

Условие сопряжения для неидеального теплового контакта записывается в виде [39]:

$$\lambda_1(T) \frac{\partial T_1}{\partial x_2} \Big|_{x_2=N+} - \lambda_2(T) \frac{\partial T_2}{\partial x_2} \Big|_{x_2=-N} = q(\tau); \quad (2.7)$$

$$\lambda_2(T) \frac{\partial T_1}{\partial x_2} \Big|_{-0} = \alpha_S (T_2|_{N+} - T_1|_{-N}) \quad \text{или} \quad \Delta T = T_2|_{N+} - T_1|_{-N}. \quad (2.8)$$

Для приближенного решения задачи (1.8), (2.7), (2.8) согласно (1.18) и (1.19), введя вектор $\gamma = (\lambda_1, \lambda_2, a_1, a_2)$, запишем функцию аппроксимации зависимости ТС от значений избыточной температуры в следующем виде [30]:

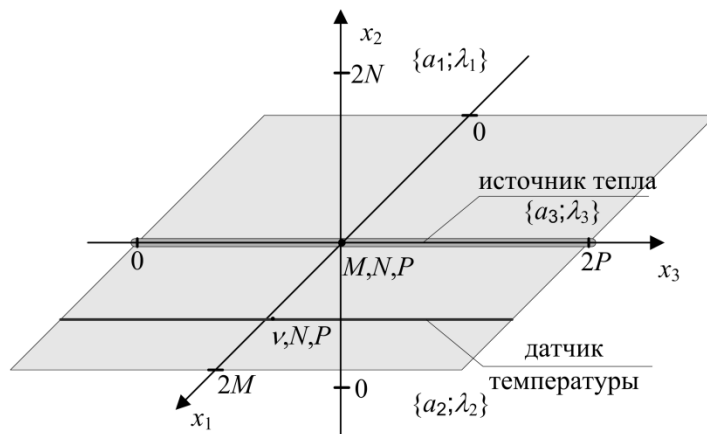


Рис. 2.4. Пространственная модель прямой задачи теплопроводности

$$\gamma_i(T) = \begin{cases} \tilde{\gamma}_i(1 + TK_{1\gamma}), & T < T_1; \\ \tilde{\gamma}_i(1 + T_1(K_{1\gamma} - K_{2\gamma}) + K_{2\gamma}T), & T_1 < T \leq T_2; \\ \tilde{\gamma}_i(1 + T_1(K_{1\gamma} - K_{2\gamma}) + T_2(K_{2\gamma} - K_{3\gamma}) + K_{3\gamma}T), & T > T_2, \end{cases} \quad (2.9)$$

где $\tilde{\gamma}$ – значение параметра при равенстве избыточной температуры нулю.

Расчет температуры в плоскости контакта на основании эквивалентной схемы [55] проводим следующим образом:

$$T|_N = T_2|_{N+} + T_1|_{-N} - \Delta T = [T_2|_{N+} + T_1|_{-N}] (1 - \alpha_S^*), \quad (2.10)$$

где α_S^* – коэффициент тепловых потерь.

Расчет теплопереноса вдоль нагревателя и датчика температуры осуществляется путем введения дополнительных прогонок вдоль оси x_3 для заданных координат с учетом a_3 , используя разностную схему (1.13).

2.5. АЛГОРИТМ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ

Структура алгоритма расчета трехмерной задачи состоит в организации счета внутри цикла по времени. Каждый шаг по времени состоит из трех частей, в которых проводится прогонка по какому-либо одному направлению. Расчет сеточной модели производится в пространственной сетке размерами $2M \times 2N \times 2P$. Линейный импульсный источник тепла находится вдоль линии $\{M, N, x_3\}$, датчик температуры – термопара по линии $\{v, N, x_3\}$. Плоскость контакта двух материалов описывается уравнением $x_2 = N$. «Прогонки» производят по оси x_1 в точках $m = \overline{1, 2M-1}$, по оси x_2 в точках $n = \overline{1, 2N-1}$, по оси x_3 в точках $p = \overline{1, 2P-1}$ с шагом Δx и с шагом по времени $\Delta \tau$ в интервале $k = \overline{0, K}$.

Рассмотрим алгоритм расчета с учетом (2.9), (2.10) для избыточных значений температур [30].

Шаг 1. Используются:

– начальное условие

$$T(x_1, x_2, x_3, \tau)|_{\tau=0} = T_0 = 0;$$

– граничные

$$T(x_1, x_2, x_3, \tau) \Big|_{\substack{x_1=0; \\ x_1=2M}} = 0, \quad T(x_1, x_2, x_3, \tau) \Big|_{\substack{x_2=0; \\ x_2=2N}} = 0, \\ T(x_1, x_2, x_3, \tau) \Big|_{\substack{x_3=0; \\ x_3=2P}} = 0.$$

Шаг 2. Для каждой итерации по времени для расчета разностного решения $T_{m,n,p}^k$ сначала вычисляется промежуточная сеточная функция для линейного источника тепла:

$$T_{M,N,p}^k = \frac{q}{\lambda_1(T_{M,N,p}^k) + \lambda_2(T_{M,N,p}^k)} \quad \text{при } \tau \leq \tau^*; \\ T_{M,N,p}^k = \frac{q \exp\left\{-\frac{k\Delta\tau - \tau^*}{\beta}\right\}}{\lambda_1(T_{M,N,p}^k) + \lambda_2(T_{M,N,p}^k)} \quad \text{при } \tau > \tau^*; \\ T_{M,N,p}^{k+1} = \left(1 - \frac{2\Delta\tau a_3}{\Delta x^2}\right) T_{M,N,p}^k + \frac{\Delta\tau}{\Delta x^2} a_3 (T_{M,N,p+1}^k + T_{M,N,p-1}^k) \quad \text{при } p = \overline{1, 2P-1}$$

и термодатчика:

$$T_{v,N,p}^k = \left[T_{v,N+1,p}^k \frac{\lambda_1(T_{v,N+1,p}^k)}{\lambda_1(T_{v,N+1,p}^k) + \lambda_2(T_{v,N+1,p}^k)} + \right. \\ \left. + T_{v,N-1,p}^k \frac{\lambda_2(T_{v,N-1,p}^k)}{\lambda_1(T_{v,N-1,p}^k) + \lambda_2(T_{v,N-1,p}^k)} \right] (1 - \alpha_S^*); \\ T_{v,N,p}^{k+1} = \left(1 - \frac{2\Delta\tau a_3}{\Delta x^2}\right) T_{v,N,p}^k + \frac{\Delta\tau}{\Delta x^2} a_3 (T_{v,N,p+1}^k + T_{v,N,p-1}^k)$$

при $p = \overline{1, 2P-1}$.

Шаг 3. Применяют уравнения для искомой сеточной функции $T_{m,n,p}^{k+1}$ «прогонками вдоль осей x_1, x_2, x_3 », соответствующей температуре на $(k+1)$ -м временном слое:

$$T_{m,n,p}^{k+1} = \left(1 - \frac{6\Delta\tau a_i(T_{m,n,p}^k)}{\Delta x^2}\right) T_{m,n,p}^k + \frac{\Delta\tau}{\Delta x^2} (a_i(T_{m+1,n,p}^k) T_{m+1,n,p}^k + a_i(T_{m-1,n,p}^k) T_{m-1,n,p}^k + a_i(T_{m,n+1,p}^k) T_{m,n+1,p}^k + a_i(T_{m,n-1,p}^k) T_{m,n-1,p}^k + a_i(T_{m,n,p+1}^k) T_{m,n,p+1}^k + a_i(T_{m,n,p-1}^k) T_{m,n,p-1}^k)$$

при $m = \overline{1, 2M-1}$; $n = \overline{N+1, 2N-1}$; $p = \overline{1, 2P-1}$; $a(x_2) = a_1$ и $m = \overline{1, 2M-1}$; $n = \overline{1, N-1}$; $p = \overline{1, 2P-1}$; $a(x_2) = a_2$, $i = 1, 2$.

Шаг 4. Последним шагом расчетов является определение температурного поля в плоскости контакта:

$$T_{m,N,p}^k = \left[T_{m,N+1,p}^k \frac{\lambda_1(T_{m,N+1,p}^k)}{\lambda_1(T_{m,N+1,p}^k) + \lambda_2(T_{m,N+1,p}^k)} + T_{m,N-1,p}^k \frac{\lambda_2(T_{m,N-1,p}^k)}{\lambda_1(T_{m,N-1,p}^k) + \lambda_2(T_{m,N-1,p}^k)} \right] (1 - \alpha_S^*)$$

при $m = \overline{1, v-1}$, $m = \overline{v+1, 2M-1}$, $p = \overline{1, 2P-1}$.

Шаги 2 – 4 повторяются для $k = 1, 2, \dots, K$.

Данный алгоритм реализован в виде функции Boer3D(·) как Dynamic Linked Library (DLL) для использования в среде математического моделирования MathCAD (прил. Б).

Входные данные специализированной функции Boer3D() [52, 56]:

$$\text{Boer } 3D \left(\begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 \\ K_{1a} & K_{2a} & K_{3a} \\ K_{1\lambda} & K_{2\lambda} & K_{3\lambda} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} N & \tau^* \\ K & q \\ \Delta x & \alpha_S^* \\ d & v \\ \Delta\tau & \beta \end{pmatrix} \right),$$

где d – переменная управления выходными данными, $d = \overline{0, 5}$.

Выходные данные:

1. Управляющая переменная $d = 0$.

Функция Boer3D(·) генерирует двумерный массив значений температуры в точке $\{M + v, N, P\}$ в зависимости от времени аналогично (2.6).

2. Управляющая переменная $d = 1$.

Функция Boer3D() генерирует двумерный массив значений температуры в плоскости $\{m, n, 0\}$ в момент времени $K\Delta\tau$ аналогично выражению (2.7).

3. Управляющая переменная $d = 2$.

Функция Boer3D(·) генерирует двумерный массив значений температуры вдоль линии нагревателя $\{0, 0, p\}$ в момент времени $K\Delta\tau$ вида

$$\begin{pmatrix} 0 & T(K\Delta\tau, 0) \\ \Delta x & T(K\Delta\tau, \Delta x) \\ 2\Delta x & T(K\Delta\tau, 2\Delta x) \\ \dots & \dots \\ 2N\Delta x & T(K\Delta\tau, 2P\Delta x) \end{pmatrix}. \quad (2.11)$$

2.6. ПРАКТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ПО ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

В ходе экспериментальных исследований на материалах с известными ТС были установлены следующие значения параметров дискретной модели [30]: точка контроля расположена от линейного нагревателя на расстоянии $1,85 \cdot 10^{-3}$ м, $a_1 = 2,9 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, $\lambda_1 = 0,31 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ (пенополиуретан – ППУ) и $a_1 = 4,1 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, $\lambda_1 = 0,168 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ (синтетический каучук термостойкий низкомолекулярный форма цинковая – СКТНФ(Ц)); $a_2 = 2,92 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, $\lambda_2 = 0,05 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ (кремнеземное составляющее связующее бетонит – КССБ); $a_3 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; $\Delta x = 615 \cdot 10^{-6}$ м; $\Delta\tau = 10$ мс; $\tau^* = 210$ мс; $\alpha_S^* = 0,05$; $\beta = 0,095$ с; $M = N = P = 8$; $K_{1a} = -0,001 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$; $K_{2a} = -0,01 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$; $K_{3a} = -0,05 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$; $K_{1\lambda} = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$; $K_{2\lambda} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$; $K_{3\lambda} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$.

Графики зависимости относительных значений ТС: $1 - a(T)/a(0)$, $2 - \lambda(T)/\lambda(0)$ от температуры T , согласно (1.18), (1.19), представлены на рис. 2.5. Из графиков следует, что скорость изменения теплопроводности с ростом температуры значительно выше, чем у температуропроводности.

Результаты расчета изменения температуры T вдоль линии нагревателя x_3 при длительности теплового импульса $\tau^* = 210$ мс в моменты времени: 1 – $\tau = 100$ мс; 2 – $\tau = 300$ мс; 3 – $\tau = 1$ с; 4 – $\tau = 2$ с, приведены на рис. 2.6. Графики показывают, что максимальное значение избыточной температуры составляет 114 К, и со временем происходит «сглаживание» температуры к концам нагревателя.

Представляет интерес вопрос о возникающей динамической погрешности измерений в результате применения термопары, которая обладает собственной теплоемкостью. На рис. 2.7 приведены графики изменения разности температур ΔT в зависимости от времени τ в точке расположения горячего спая термопары $T(v, N, P)$ и в точке $T(2M - v, N, P)$, симметричной относительно линии нагревателя, при испытаниях 1 – каучука СКТНФ(Ц), 2 – ППУ.

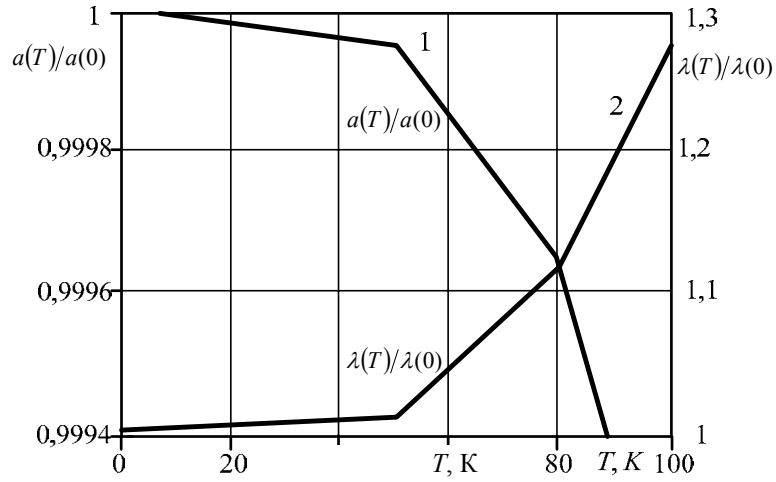


Рис. 2.5. Графики изменения относительных значений ТС

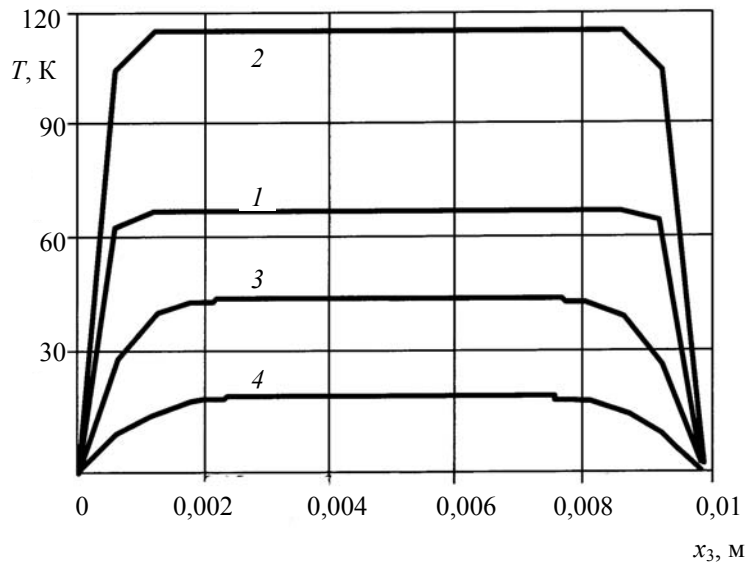


Рис. 2.6. Графики зависимости изменения избыточной температуры вдоль линии нагревателя

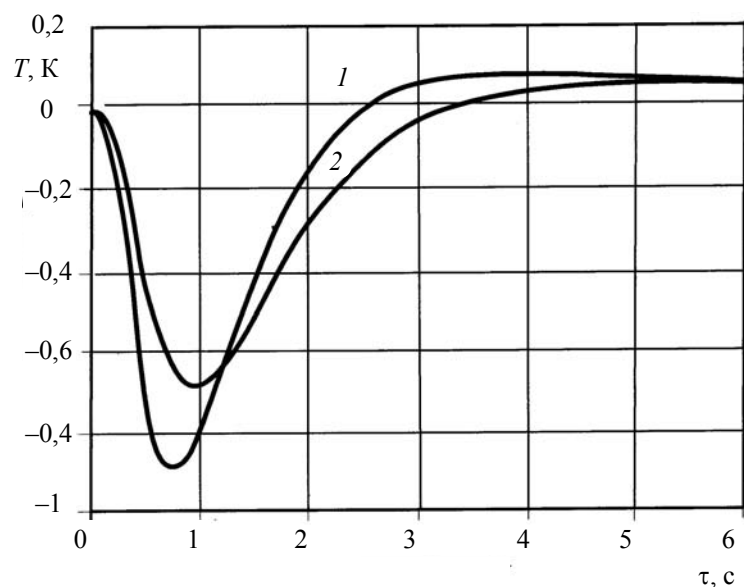


Рис. 2.7. Графики изменения абсолютной динамической погрешности измерений

Видно, что максимальная динамическая погрешность возникает в интервале $[0, 2]$ с, на котором измеряемое значение температуры меньше чем если бы в плоскости контакта термопары не было, и, наоборот, на стадии релаксации теплового потока измеряемое значение завышено примерно на $0,1$ К.

На рис. 2.8 показаны изотермы в плоскости $\{x_1, x_2, 0\}$ через $4,5$ с после начала действия импульсного линейного источника тепла.

Из анализа рисунка следует, что контактное термическое сопротивление замедляет распространение изотерм вдоль плоскости контакта, вследствие чего температурное поле имеет вид линии Касини при вращении, а не эллипсоида вращения, как при идеальном тепловом контакте.

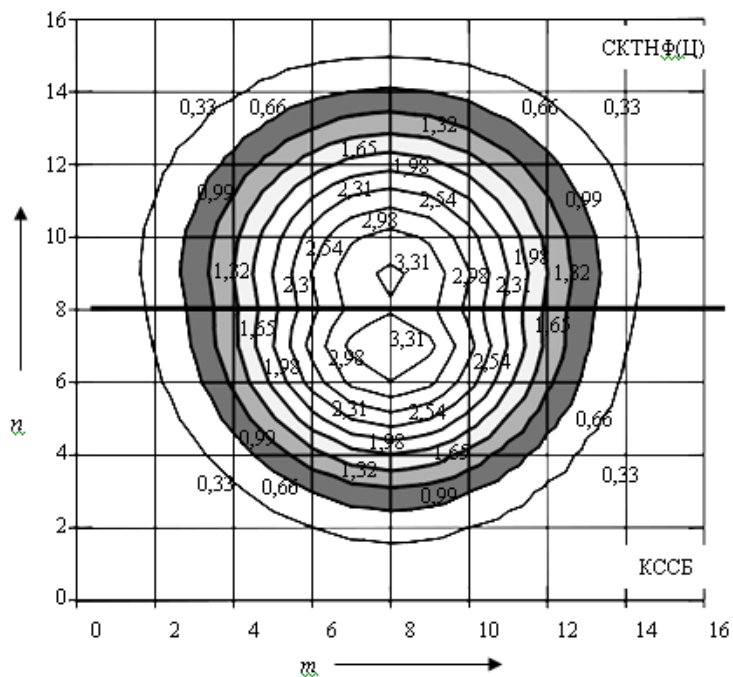


Рис. 2.8. Изотермы в плоскости $\{x_1, x_2, 0\}$ в момент времени $\tau = 4,5$ с при испытаниях бетона КССБ и каучука СКТНФ(Ц)

Таким образом, на основе разностных схем предложена трехмерная дискретная модель нелинейной задачи теплопроводности с разрывными коэффициентами и линейным импульсным источником тепла, адекватная как физической модели, так и реальным экспериментальным данным, позволяющая рассчитать температурные поля в любой точке или плоскости моделируемого объема и оценить динамическую погрешность измерений в результате применения термопар в качестве датчика температуры.

3. ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ С РАЗРЫВНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ И ВНУТРЕННИМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛА

Одной из задач нового научного направления вычислительной теплофизики являются оптимизационные задачи, основанные на специальных экспериментах и более точных теоретических результатах с привлечением положений теории подобия [24, 57, 58].

Методика решения оптимизационной задачи основывается на принципе минимизации отклонения (невязки) – принципе обратной связи. Решение задачи условно разделено на две части: получение неявной математической модели с сосредоточенными параметрами путем перехода от реальной физической модели с распределенными параметрами на основе численного решения методом сеток или конечных элементов и решение коэффициентной обратной нелинейной задачи теплопроводности вариационно-итерационным методом путем минимизации функционала невязки, при этом тепловое моделирование выполняется на основании результатов экспериментальных исследований, что соответствует этапам обработки информации (см. рис. 1.4).

3.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ НА ОСНОВЕ МНОГОФАКТОРНЫХ ФУНКЦИЙ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ОБРАТНЫХ ЗАДАЧАХ

Рассмотрим численный метод решения коэффициентной обратной задачи теплопроводности на основе применения многофакторных функций преобразования (МФП) [59 – 61].

В работах [48, 60] предложена методика расчета коэффициента чувствительности. Проведенный анализ МФП импульсных методов определения ТС (абсолютных значений температур, максимальных значений температур, наперед заданного отношения температур, интегральных значений температур) показал, что для уменьшения погрешности определения ТС материалами выходными параметрами измерительной системы должны быть: время регистрации заданного отношения избыточной температуры к скорости ее изменения τ_0 (рис. 2.3, б, кривая 3) и интегральное значение температуры – $I = \int T(r, \tau) d\tau$ (рис. 2.3, б).

Полагая, что ТС исследуемых теплоизоляционных материалов находятся в диапазоне измерений $a_1 \in [1; 10] \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ и $\lambda_1 \in [0,01; 1,6] \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, МФП, рассчитанные на основании двумерной дискретной модели Boer2D(\cdot), для τ_0 и I примут вид, представленный на рис. 3.1 и 3.2, соответственно.

Численное построение МФП для τ_0 (рис. 3.1) производится согласно выражению:

$$\frac{T_{N,v}^k - T_{N,v}^{k-1}}{\Delta\tau} A - T_{N,v}^k \leq 0, \tag{3.1}$$

где $k = \overline{1, k_{\max}}$, k_{\max} – наблюдаемое количество отсчетов по времени; v – координата точки расположения датчика температуры; A – наперед заданное отношение избыточной температуры к скорости ее изменения (в расчетах модели принято $A = 30$, $v = 3$, что соответствует расстоянию от линии источника тепла до датчика температуры $v \times \Delta x = 1,64 \cdot 10^{-3} \text{ м}$).

В момент выполнения неравенства (3.1) рассчитывается $\tau_0 = k\Delta\tau$.

При построении МФП для I (рис. 3.2) используется квадратичная формула трапеции:

$$I_{k+1} = I_k + \left(T_{N,v}^{k+1} + T_{N,v}^k \right) \frac{\Delta\tau}{2}, \quad k = \overline{1, (\tau_0 / \Delta\tau)}.$$

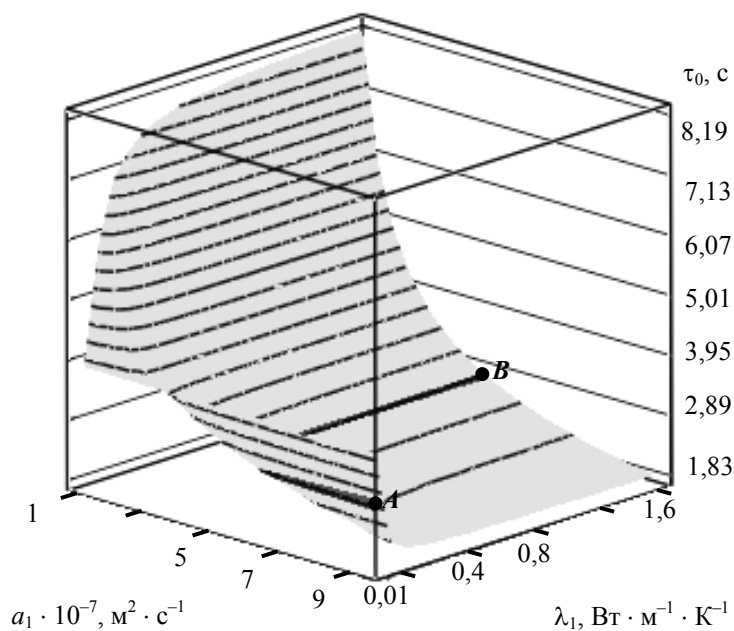


Рис. 3.1. Многофакторная функция преобразования для τ_0

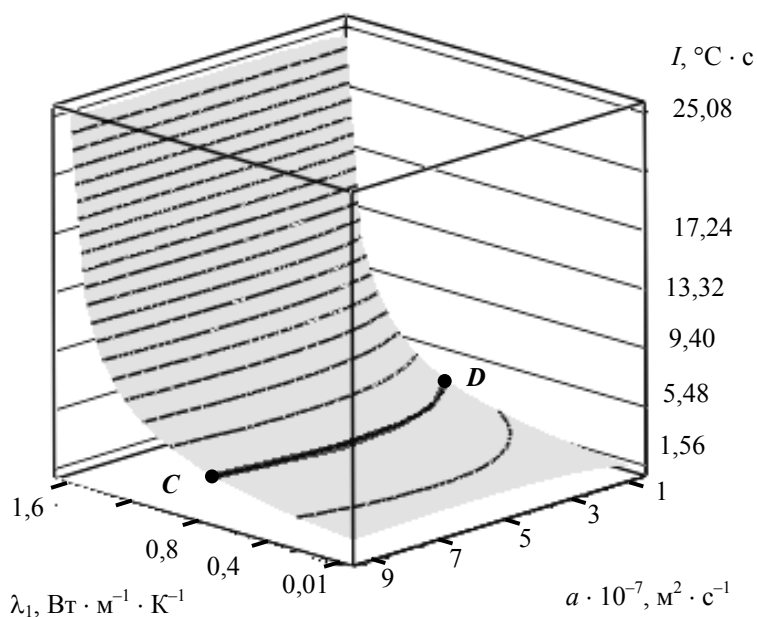


Рис. 3.2. Многофакторная функция преобразования для I

Расчет производится для дискретных значений a_1^d, λ_1^d (d – номер отсчета) при $d = \overline{0,19}$ с шагом $\Delta a_1 = 0,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, $\Delta \lambda_1 = 0,08 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$.

Численное интегрирование производится на интервале времени $[1; \tau_0]$ с целью уменьшения составляющей инструментальной погрешности.

Сущность метода определения ТС заключается в следующем [56]. Приводят в тепловой контакт плоские поверхности образцов исследуемого и эталонного материалов, полуограниченных в тепловом отношении. В плоскости контакта располагают линейный источник нагрева и датчик температуры на заданном расстоянии $r = 1,64 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ от линии нагрева. Осуществляют импульсное тепловое воздействие от линейного источника длительностью $\tau^* = 250 \text{ мс}$. Выходными параметрами устройства – зонда являются время регистрации τ_0 заданного отношения избыточной температуры к скорости ее изменения и интегральное значение температуры I .

На рис. 3.1 пересечение поверхности МФП с плоскостью, соответствующей значению τ_0 , представлено в виде линии AB . На рис. 3.2 пересечение поверхности МФП с плоскостью, соответствующей значению I , представлено в виде линии CD .

Рассмотрим методику решения данной обратной задачи с графической интерпретацией (рис. 3.3) [60].

В практической реализации измерительной системы идентификации ТС дискретные значения избыточных температур в диапазоне от 0 до 30 °С с интервалом следования $\Delta\hat{t} = 125$ мс обрабатываются в соответствии с алгоритмом:

1. Фильтрация данных на основе функции Гаусса с целью исключения высокочастотной случайной составляющей погрешности измерения:

$$T_{N,v}^k = \frac{\sum_{j=1}^H F\left(\frac{\hat{T}_{N,v}^k - \hat{T}_{N,v}^j}{b}\right) \Delta\hat{t}^j}{\sum_{j=1}^H F\left(\frac{\hat{T}_{N,v}^k - \hat{T}_{N,v}^j}{b}\right)},$$

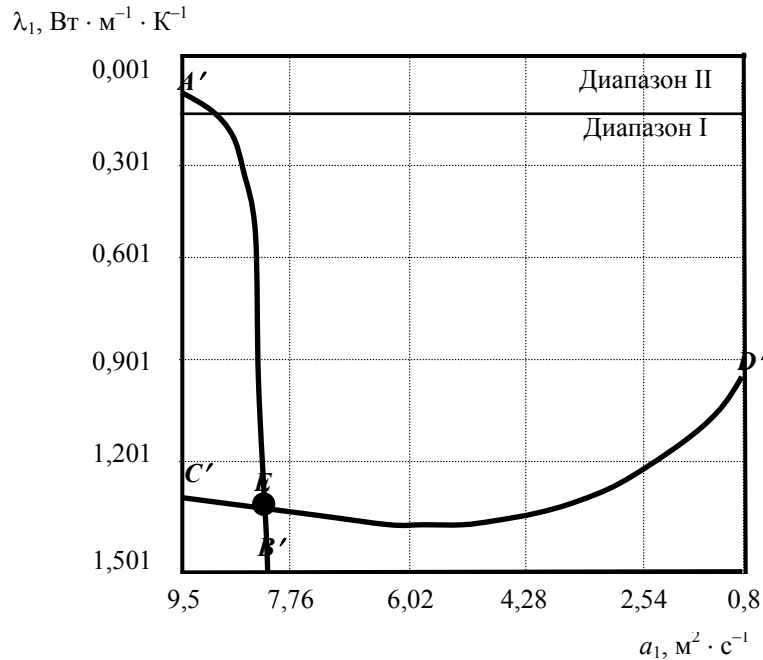


Рис. 3.3. Графическая интерпретация решения коэффициентной задачи

где $F(t) = \frac{1}{0,37\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{t^2}{2 \cdot 0,37^2}\right\}$; $T_{N,v}^k$ – матрица отфильтрованных значений температуры в точке $\{N, v\}$ в момент времени $k\Delta\hat{t}$, которая ставится в соответствие дискретным значениям температур, полученным моделированием МКР; H – количество отсчетов по времени; b – ширина окна сглаживания; $\hat{T}_{N,v}^k$ – дискретные значения температур, измеренные зондом.

2. Линейная сплайн-интерполяция дискретных значений температур на интервале времени $\overline{0, 10}$ с с целью замены дискретной (решетчатой) функции температуры непрерывной:

$$T_{N,v}^k \rightarrow T(\tau).$$

3. Исключение динамической составляющей погрешности измерений в связи с инерционностью датчика температуры – термопары [62]:

$$T(\tau) = t_{\text{const}} \frac{\partial T(\tau)}{\partial \tau} + T(\tau),$$

где t_{const} – постоянная времени, определенная экспериментально, равная 0,25 с.

4. Расчет времени регистрации τ_0 наперед заданного соотношения избыточной температуры к ее скорости итерационным методом из уравнения:

$$T(\tau) - K \frac{\partial T(\tau)}{\partial \tau} = 0.$$

5. Расчет интегрального значения температуры:

$$I = \int_1^{\tau_0} T(\tau) d\tau.$$

6. Двухмерная линейная сплайн-интерполяция МФП для τ_0 и I :

$$\begin{aligned} \tau_0(a_1^d, \lambda_1^d) &\rightarrow \tau_0(a_1, \lambda_1); \\ I(a_1^d, \lambda_1^d) &\rightarrow I(a_1, \lambda_1). \end{aligned}$$

7. Поиск совместного решения системы уравнений на основе МФП методом Левенберга с целью идентификации искомого значений a_1, λ_1 :

$$\begin{cases} \tau_0(a_1, \lambda_1) - \tau_0 = 0; \\ I(a_1, \lambda_1) - I = 0. \end{cases} \quad (3.2)$$

В аналитической геометрии интерпретация решения системы уравнений совпадает с задачей об определении точек пересечения линий. На рис. 3.3 представлена графическая интерпретация решения уравнений (3.2), где точка пересечения E двух проекций линий неопределенности $A'B'$ и $C'D'$ является совместным решением с координатами $a_1 = 8,405 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; $\lambda_1 = 1,357 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ при определении ТС кварцевого стекла КВ и выходных параметрах измерительного зонда $\tau_0 = 2,02 \text{ с}$, $I = 3,55 \text{ }^\circ\text{С} \cdot \text{с}$.

Для проведения испытаний исследуемых материалов предварительно рассчитывают МФП, которые являются постоянными измерительной системы. В процессе измерений каждый раз определяют выходные параметры τ_0 и I , на основании которых ТС рассчитывают из системы уравнений (3.2).

Результаты экспериментального определения ТС ряда материалов приведены в работе [48].

3.2. РЕШЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТНОЙ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ МЕТОДОМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ [63]

Несомненно, применение численных методов значительно расширяет возможности по созданию математических моделей, адекватных натурным экспериментам. Кроме того, получая дискретные модели прямой задачи с помощью разностных методов, использование численных методов решения оптимизационных задач делает возможным эффективно решить и обратную задачу.

Сущность идентификации ТС материалов методом параметрической оптимизации заключается в следующем [64]. Приводят в тепловой контакт плоские поверхности образцов диагностируемого и эталонного материалов, полуограниченных в тепловом отношении. В плоскости контакта располагают линейный источник нагрева и датчик температуры на заданном расстоянии $r = 1,85 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ от линии нагрева. Осуществляют импульсное тепловое воздействие от линейного источника длительностью $\tau^* = 250 \text{ мс}$. С помощью датчика температуры производят запись изменения избыточного значения температуры с момента подачи теплового импульса на интервале времени $[0, 15] \text{ с}$.

В общем случае оптимизационная задача состоит в следующем. Представим численное решение ПЗТ (п. 2.2, функция Воер2D) в виде непрерывной функции $T(\tau; \psi_{\Pi})$. Необходимо найти минимум невязки между $T(\tau; \psi_{\Pi})$ и значениями температур $\tilde{T}(\tau)$, измеряемыми на поверхности диагностируемого материала с некоторой точностью, используя функционал:

$$\left\{ J(\psi_{\Pi}) = \int_0^T (T(\tau; \psi_{\Pi}) - \tilde{T}(\tau))^2 d\tau \right\} \leq \delta, \quad (3.3)$$

$$\Pi = 2: \psi_1 = a_1, \psi_2 = \lambda_1, \text{ при ограничениях: } 0 < a_{\min} < a_1 < a_{\max}, 0 < \lambda_{\min} < \lambda_1 < \lambda_{\max}.$$

Искомые параметры a_1, λ_1 находят из минимума критерия качества J . При минимальном значении критерия значения избыточных температур, рассчитанные математической моделью и полученные при реальном испытании, совпадают с минимально возможным значением невязки, следовательно, значениям ТС исследуемого материала ставятся в соответствие значения их оценок $\hat{\lambda}_1$ и \hat{a}_1 . Для ускоренного численного решения оптимизационной задачи согласно критерию (3.3) применяют алгоритмы градиента Конжунгейта или квазиньютонового типа.

На рис. 3.4 представлены графики изменения избыточных температур: 1 (пунктирная линия) – экспериментально измеренные, 2 (непрерывная линия) – график обработанных данных по методике [48], 3 (штриховая линия) – график изменения избыточной температуры, построенный с помощью функции Воер2D(·), соответствующий минимуму критерия (3.3).

Однако при решении коэффициентной задачи возникает необходимость оценки интервалов неопределенности идентификации ТС в ходе однократного испытания. В этом случае решение обратной задачи теплопроводности производится с помощью метода последовательных приближений для заданного порогового значения невязки \hat{J} [45].

Сущность метода заключается в пошаговом расчете критерия (3.3) при последовательном переборе значений ТС в заданном диапазоне идентификации [65]: $\lambda_1(j) = \lambda_1^0 + \Delta\lambda j$ и $a_1(k) = a_1^0 + \Delta a k$, где λ_1^0, a_1^0 – начальные значения ТС;

$\Delta\lambda, \Delta a$ – приращение; j, k – номера отсчетов. При этом становится возможным идентифицировать такие значения ТС, при которых выполняется наперед заданное условие для значения невязки \hat{J} .

Так, при идентификации ТС в случае выполнения равенства $J \geq \hat{J}$ ТС ставятся в соответствие значения $\{\hat{a}_{\text{нп}}, \hat{\lambda}_{\text{нп}}\}$, а при выполнении неравенства $J \leq \hat{J}$ ставятся в соответствие значения $\{\hat{a}_{\text{вп}}, \hat{\lambda}_{\text{вп}}\}$.

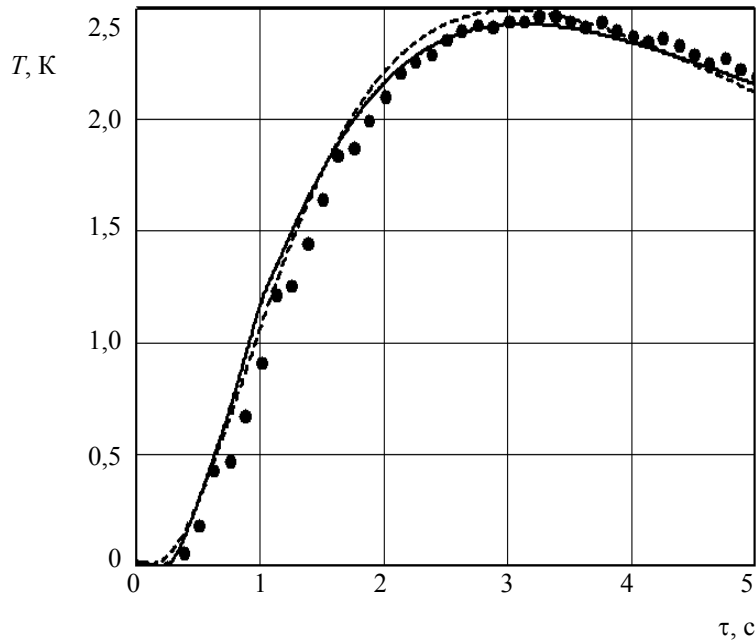


Рис. 3.4. Графики избыточных температур при идентификации ТС на основе параметрической оптимизации

На рис. 3.5 изображены графики избыточных значений температур при идентификации ТС бетонита КССБ ($\hat{J} = 0,1$): 1 – график изменения избыточной температуры для $\{\hat{a}_{\text{нп}}, \hat{\lambda}_{\text{нп}}\}$, 2 – график изменения избыточной температуры для $\{\hat{a}_{\text{вп}}, \hat{\lambda}_{\text{вп}}\}$, 3 – область неопределенности, в которой выполняется условие $J < \hat{J}$, штриховая линия – изменение температуры, построенное дискретной моделью для минимального значения J , пунктирная линия – изменение температуры реального испытания.

По существу в настоящем подходе используется концепция статистического прямого поиска, в котором отслеживается значение невязки по вектору значений ТС с целью достижения минимума J , как показано на рис. 3.6. Процедура прямого поиска для идентификации ТС испытуемого материала не использует градиентных методов оптимизации, в связи с чем поиск показателя качества идентификации J в пространстве возможных значений происходит значительно дольше, однако выигрыш состоит в определении диапазона неопределенности идентификации.

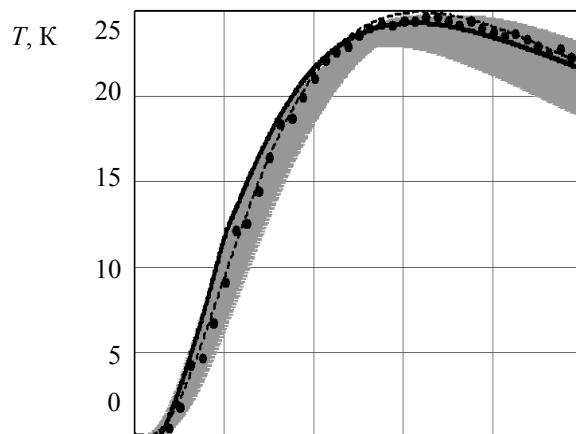


Рис. 3.5. Графики избыточных температур при идентификации ТС на основе последовательного приближения

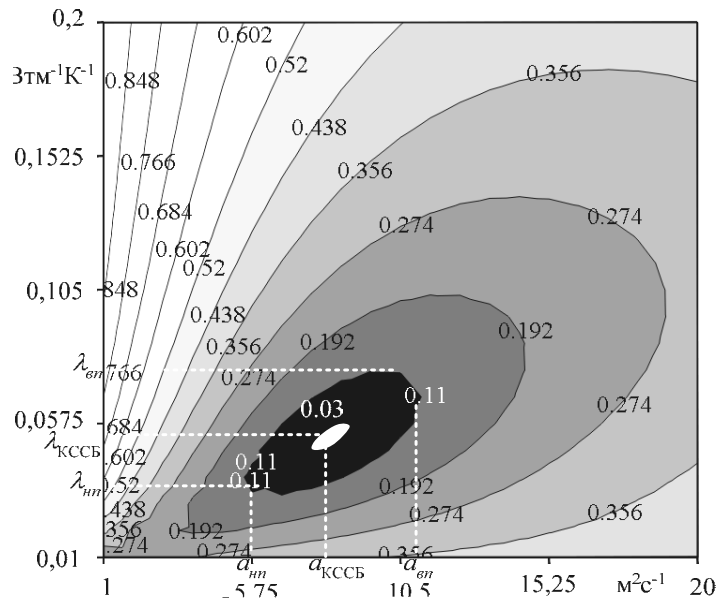


Рис. 3.6. Прямой поиск значений ТС, графическая интерпретация расчета диапазона неопределенности идентификации бетона КССБ

Так, на рис. 3.6 область неопределенности для возможных значений невязки $J < 11\%$ обозначена черным цветом, соответственно диапазон неопределенности для ТС это есть проекции данной области на соответствующие оси.

Данные методы получили свое развитие в работах [66 – 68]. Если нагрев источником теплоты осуществлять непрерывно, тогда в расчетах необходимо применять промежуточную сеточную функцию источника нагрева [66]:

$$T_{M,N}^k = \frac{q}{\lambda_1(1 + K_\lambda T_{M,N}^k) + \lambda_2(1 + K_\lambda T_{M,N}^k)}, \quad \tau > 0.$$

В методе из работы [67] предложено разбиение времени наблюдения избыточной температуры (рис. 3.4) на 3 интервала $[\tau_0, \tau_1]$, $(\tau_1, \tau_2]$ и $(\tau_2, \tau_3]$, где $\tau_0 = 0$; τ_1 – момент времени наступления максимального значения скорости изменения избыточной температуры; $\tau_2 = 2\tau_{\max} - \tau_1$; τ_{\max} – момент времени наступления максимального значения избыточной температуры; τ_3 – момент времени окончания измерений.

Расчет невязки для интервалов времени $[\tau_0, \tau_1]$, $(\tau_1, \tau_2]$ и $(\tau_2, \tau_3]$ с весовыми коэффициентами p_1, p_2, p_3 , соответственно, позволяет ранжировать временные участки измеренной избыточной температуры. Так, на интервале времени $[0, \tau_1]$ экспериментально измеренная избыточная температура содержит в себе значительную динамическую погрешность, на интервале $(\tau_1, \tau_2]$ значение температуры имеет наибольшее значение, соответственно меньшую инструментальную погрешность измерений, поэтому введение весовых коэффициентов, удовлетворяющих неравенству $p_1 \ll p_3 < p_2$, позволяет более точно идентифицировать значения λ_1 и a_1 . Для решения задачи идентификации ТС необходимо минимизировать критерий:

$$\left\{ J(a_1, \lambda_1) = \left(\sum_{j=1}^3 p_j \right)^{-1} \sum_{i=1}^3 \left[\frac{p_i}{\tau_i - \tau_{i-1}} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} (T(\tau; a_1, \lambda_1) - \tilde{T}(\tau))^2 dt \right] \right\} \leq \delta \quad (3.4)$$

при ограничениях $0,1 \cdot 10^{-7} < a_1 < 1 \cdot 10^{-6}$, $0,02 < \lambda_1 < 0,5$.

Метод позволяет уменьшить влияние динамической погрешности измерения температуры.

Используя ранжирование временных участков измеренной избыточной температуры для расчета невязки и постоянный источник теплоты, можно выражение (3.4) привести к виду [68]:

$$\left\{ J(a_1, \lambda_1) = \left(\sum_{j=1}^2 p_j \right)^{-1} \sum_{i=1}^2 \left[\frac{p_i}{\tau_i - \tau_{i-1}} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} (T(\tau; a_1, \lambda_1) - \tilde{T}(\tau))^2 dt \right] + \xi(\tau_1 - \tilde{\tau}_1)^2 \right\} \rightarrow \min, \quad (3.5)$$

при ограничениях (3.4), где τ – текущее время, отсчитываемое с момента теплового воздействия; $\tau_0 = 0$; $\tilde{\tau}_1$ – момент времени наступления максимального значения скорости изменения избыточной температуры; τ_1 – момент времени наступления максимального значения скорости изменения избыточной температуры, рассчитанной математической моделью; τ_2 – момент времени равенства скорости изменения избыточной температуры нулю; ξ – параметр регуляризации.

3.3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ДВУМЕРНОЙ МОДЕЛИ

Метод идентификации ТС для заданного порогового значения невязки реализован в виде дискретной функции Ident(\cdot) как Dynamic Linked Library (DLL) для использования в среде математического моделирования MathCAD (прил. В).

Функция Ident(\cdot) на основе алгоритма Воер2D(\cdot) и метода последовательных приближений позволяет идентифицировать ТС контролируемого образца с оценкой интервалов неопределенности идентификации [69].

В качестве оценки используется среднеквадратичное отклонение (СКО), рассчитываемое на интервале наблюдения избыточной температуры с шагом дискретизации $\Delta\tau$ согласно выражению

$$J = \sqrt{\frac{\sum_{k=0}^K (T(k; a_1, \lambda_1) - \tilde{T}(k))^2}{K-1}}$$

Входные данные функции Ident(\cdot):

$$\text{Ident} \left(\begin{pmatrix} a_1 & \lambda_1 \\ a_2 & \lambda_2 \\ K_a & K_\lambda \\ a_3 & \lambda_3 \\ D_1 & D_2 \\ S_{dv} & S_h \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} N & \tau^* \\ K & q \\ \Delta x & \alpha_s \\ \hat{J} & v \\ \Delta\tau & \beta \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & T(0) \\ \Delta\tau & T(\Delta\tau) \\ 2\Delta\tau & T(2\Delta\tau) \\ \dots & \dots \\ K\Delta\tau & T(K\Delta\tau) \end{pmatrix} \right),$$

где D_1 – количество шагов счета в диапазоне идентификации теплопроводности; D_2 – количество шагов счета в диапазоне идентификации теплопроводности; \hat{J} – заданный минимальный порог оценки погрешности испытания.

Третья матрица содержит данные реального испытания, при этом первый столбец является массивом времени измерения температуры с шагом $\Delta\tau$, второй – массивом соответствующих значений избыточных температур.

Выходными данными функции Ident(\cdot) является двумерный массив идентифицированных ТС испытуемого материала в виде:

$$\begin{pmatrix} \hat{a}_{\text{вп}} & \hat{\lambda}_{\text{вп}} \\ \hat{a}_{\text{нп}} & \hat{\lambda}_{\text{нп}} \\ \hat{a} & \hat{\lambda} \\ J_{\text{min}} & c \end{pmatrix},$$

где $\{\hat{a}_{\text{вп}}, \hat{\lambda}_{\text{вп}}\}$ – верхний предел ТС, для которых выполняется условие $(J \leq \hat{J} \wedge \tilde{T} < T)$; $\{\hat{a}_{\text{нп}}, \hat{\lambda}_{\text{нп}}\}$ – нижний предел ТС, для которых выполняется условие $(J \leq \hat{J} \wedge T < \tilde{T})$; $\{\hat{a}, \hat{\lambda}\}$ – ТС испытуемого материала, идентифицированные с минимально возможным значением СКО вычисляемых температур от данных реального испытания; J_{min} – минимально возможное значение СКО вычисляемых температур от данных реального испытания; c – незадействованная переменная.

На рис. 3.7 изображены графики избыточных значений температур, изменяемых во времени: 1 – верхний предел изменения температуры, построенный с помощью дискретной модели для значения оценки погрешности испытания $+\hat{J}$; 2 – изменение температуры, построенное с помощью дискретной модели с минимальным значением оценки погрешности испытания; 3 – изменение температуры реального испытания; 4 – нижний предел изменения температуры, построенный с помощью дискретной модели для значения оценки погрешности испытания $-\hat{J}$.

Результаты идентификации ТС ряда материалов на основе разработанного алгоритма приведены в работе [63].

Пример результата использования функции Ident(\cdot) для идентификации ТС каучука ВК-9 (на основе многофункционального измерителя температуры CENTER-300) представлен на рис. 3.8.

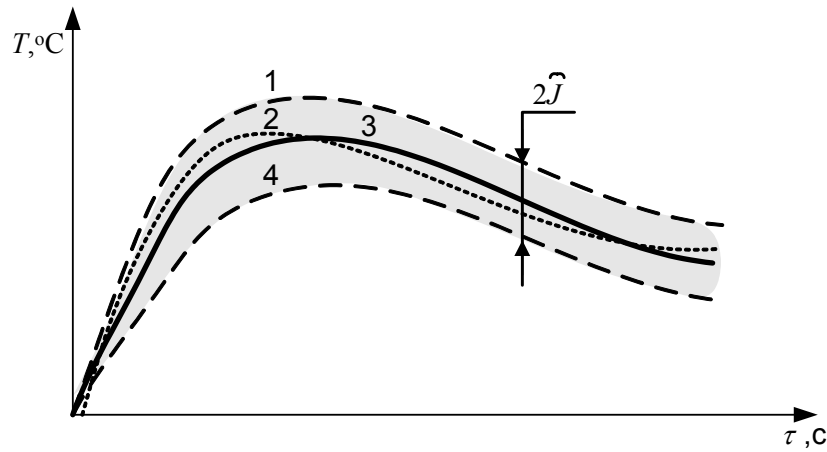


Рис. 3.7. Оценивание погрешности испытания методом последовательных приближений [65]

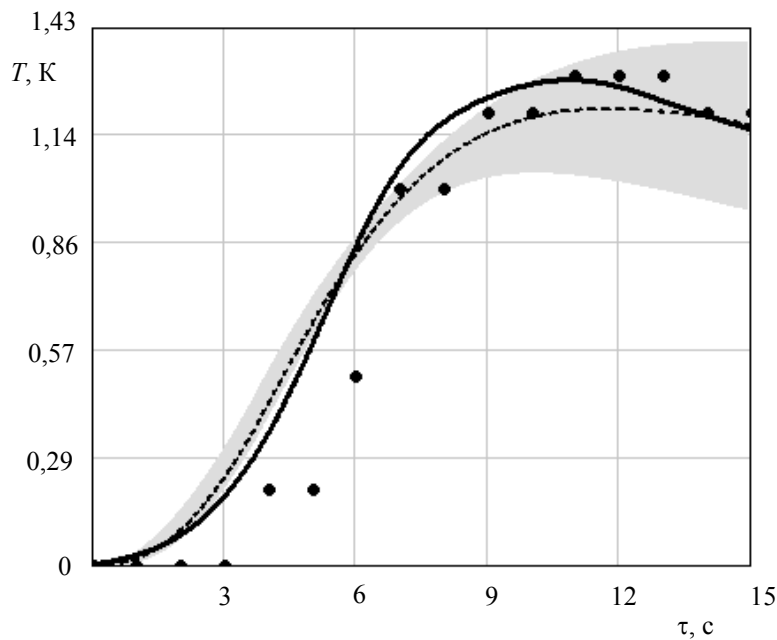


Рис. 3.8. Графики экспериментально измеренных избыточных температур и вычисленных функциями Ident(·) и Boer2D(·)

На рисунке изображены: пунктирной линией – график экспериментально измеренной температуры, непрерывной линией – график данных, обработанных по методике, изложенной в работе [48], штриховой линией – график температуры, рассчитанный с помощью функции Boer2D(·) на основе полученных оценок ТС с помощью функции Ident(·). В процессе идентификации J_{\min} составило 9,7 %, $\hat{\lambda}_1 = 0,525 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, а интервал неопределенности идентификации $\lambda_1 \in [0,2; 0,8] \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$.

Таким образом, используя функцию Ident(·) становится возможным решить коэффициентную обратную задачу теплопроводности с расчетом интервалов неопределенности идентификации ТС.

3.4. ЗАДАЧА ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТРЕХМЕРНОЙ ДИСКРЕТНОЙ МОДЕЛИ В ВАРИАЦИОННОЙ ПОСТАНОВКЕ [31]

В соответствии с этапами методики обработки информации (см. рис. 1.4) для получения численных оценок $\hat{\lambda}_1$ и \hat{a}_1 сначала необходимо идентифицировать параметры дискретной модели по материалам с известными ТС.

В этом случае вариационная задача заключается в минимизации функционала невязки (3.3), при этом зависимость ТС аппроксимируем финитными функциями (1.18), (1.19) или обобщенным выражением (2.9).

Идентификация коэффициентов дискретной модели (п. 2.3, функция Boer3D) была проведена на основе экспериментальных исследований ряда теплоизоляционных материалов [31]. При выборе числа интервалов ($p = 3$), методом параметрической оптимизации идентифицировались коэффициенты кусочно-линейной финитной функции (2.9): K_{ja} , $K_{j\lambda}$, $j = \overline{1, 3}$, и параметры неявной математической модели: q , α_s^* , β – количество тепла, коэффициент тепловых потерь, постоянная релаксации – соответственно методом интерпретатора [70, 71].

На основе градиентных итерационных методов минимизировался сглаживающий средневзвешенный критерий невязки (3.4) с учетом регуляризирующего параметра согласно (3.5) по трем материалам с известными ТС (1 – ППУ, $a_1 = 2,9 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; $\lambda_1 = 0,31 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, 2 – СКТНФ(Ц), $a_1 = 4,1 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; $\lambda_1 = 0,168 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, 3 – КССБ, $a_1 =$

$2,92 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, $\lambda_1 = 0,05 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$) с заданными значениями интервалов времени: $\tau_0 = 0$, $\tau_1 = \tau_{\max} - 2 \text{ с}$; $\tau_2 = \tau_{\max} + 1 \text{ с}$; $\tau_3 = 6 \text{ с}$; $\xi = 1 \text{ К}^2 \cdot \text{с}^{-2}$. Алгоритм идентификации искомых параметров в среде математического моделирования MathCAD приведен в прил. Г.

Идентифицированные коэффициенты дискретной модели, представленные в работе [30], позволяют моделировать тепловой процесс в заданном объеме пространства, при этом среднеквадратичное отклонение температур, рассчитанных с помощью дискретной модели Voer3D(\cdot), от натурального эксперимента для выбранных эталонных материалов (ППУ, СКТНФ(Ц), КССБ) на интервале времени $\overline{1,6}$ с составляет 1,6; 1,8 и 1,1 %, соответственно (рис. 3.9).

Для непосредственной идентификации ТС новых испытуемых теплоизоляционных материалов методом параметрической оптимизации минимизируется критерий:

$$\{J_{\xi}(a_1, \lambda_1) = \int_{\tau_0}^{\tau_3} (T(\tau; a_1, \lambda_1) - \tilde{T}(\tau))^2 + \xi_1 (\tau_{\max} - \tilde{\tau}_{\max})^2 + \xi_2 (T_{\max} - \tilde{T}_{\max})^2\} \rightarrow \min, \quad (3.6)$$

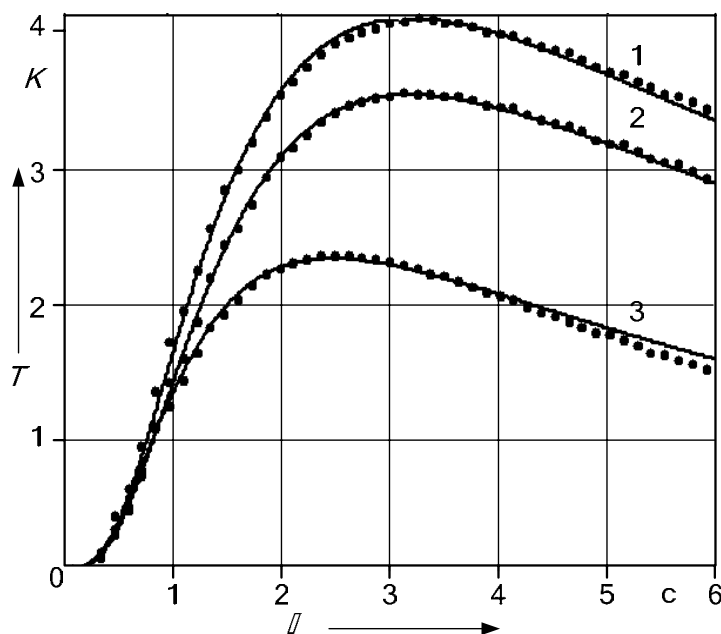


Рис. 3.9. Графики измеренных и рассчитанных избыточных температур:
1 – испытуемый материал ППУ; 2 – испытуемый материал КССБ;
3 – испытуемый материал СКТНФ(Ц)

при ограничениях: $0 < a_{\min} < a_1 < a_{\max}$, $0 < \lambda_{\min} < \lambda_1 < \lambda_{\max}$, где \tilde{T}_{\max} – измеренное максимальное значение избыточной температуры; T_{\max} – максимальное значение избыточной температуры, рассчитанное дискретной моделью.

Рассмотрим алгоритм идентификации ТС синтетического каучука СКТНФ(С) в среде математического моделирования MathCAD.

Среда математического моделирования MathCAD

1. Задание значений параметров модели:

- N:=8 – число отсчетов по расстоянию n
- M:=8 – число отсчетов по расстоянию m
- K:=600 – число отсчетов по времени
- h:= $0.615 \cdot 10^{-3}$ – шаг сетки по расстоянию
- t:=0.01 – шаг сетки по времени
- Timp:=0.21 – длительность импульса
- d:=0 – управляющая переменная
- q:=79.7358 – количество тепла
- α :=0.0487 – КТС
- β :=0.0913 – постоянная модели
- μ :=3 – сдвиг координаты точки контроля
- Tf1:=READPRN("file.txt") – файл данных
- Расстояние до датчика температуры r=1.85 мм
- K1a:=−0.001 K1 λ :=0.1
- K2a:=−0.01 K2 λ :=4
- K3a:=−0.05 K3 λ :=8 – значения параметров линейной зависимости ТС от температуры

КССБ подложка

$$a2:=2.92 \cdot 10^{-7} \quad \lambda2:=0.05$$

$$a3:=10 \cdot 10^{-7} \quad \lambda3:=60 - \text{значения TC подложки, термопары}$$

2. Сплайн-интерполяция данных:

$$r := \text{rows}(Tf1) - 1$$

$$\text{Time1} := \text{submatrix}(Tf1, 0, r, 0, 0)$$

$$T1 := \text{submatrix}(Tf1, 0, r, 1, 1)$$

$$\text{Splain1} := \text{cspline}(\text{Time1}, T1)$$

$$\text{Tint}_1(\tau) := \text{interp}(\text{Splain1}, \text{Time1}, T1, \tau)$$

$$\text{Tr}_1 := F \quad \Delta\tau := \text{Time1}_2 - \text{Time1}_1$$

$$rr := \text{rows}(\text{Tr}_1) - 1$$

$$\text{Mem}_T1 := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0..r \\ v_i \leftarrow \text{Tint}_1(i \cdot \Delta\tau) \\ v \end{array} \right.$$

3. Приведение данных измерений к формату данных математической модели:

$$\text{Splain1} := \text{cspline}(\text{Time1}, \text{Mem}_T1)$$

$$\text{Tint}_1(\tau) := \text{interp}(\text{Splain1}, \text{Time1}, \text{Mem}_T1, \tau)$$

$$\text{Hot} := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0..K-1 \\ \left| \begin{array}{l} v_{i,1} \leftarrow \text{Tint}_1(i \cdot t) \\ v_{i,0} \leftarrow i \cdot t \end{array} \right. \\ v \end{array} \right.$$

4. Формирование критерия (3.6) в дискретной форме:

$$\xi := 100 \quad \delta := 0.09 \quad \Xi := 10^{10} \quad \gamma := 1 \quad P1 := 0.0767 \quad P2 := 1 \quad P3 := 0.4768 \quad \lambda1 := 0.03 \quad a1 := 3$$

$$\text{SKO}(a1, \lambda1) := \left| \begin{array}{l} \text{TT} \leftarrow \text{Boer3D} \left[\begin{array}{ccc} \left(\begin{array}{ccc} a1 \cdot 10^{-7} & a2 & a3 \\ \lambda1 & \lambda2 & \lambda3 \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} N \\ K \\ h \\ d \\ t \end{array} \right) \\ \left(\begin{array}{ccc} K1a \cdot 10^{-3} & K2a \cdot 10^{-3} & K3a \cdot 10^{-3} \\ K1\lambda \cdot 10^{-3} & K2\lambda \cdot 10^{-3} & K3\lambda \cdot 10^{-3} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} q \\ \alpha \\ 3 \\ \beta \end{array} \right) \end{array} \right. \\ t_{\max} \leftarrow 0 \\ V_{\max} \leftarrow \max[\text{TT}]^{(1)} \\ \text{while } \text{TT}_{t_{\max},1} - V_{\max} \neq 0 \\ t_{\max} \leftarrow t_{\max} + 1 \\ J \leftarrow \sum_{i=1}^{K-1} (\text{Hot}_{i,1} - \text{TT}_{i,1})^2 + \gamma \cdot \left[\frac{(t_{\max} - \text{Max})}{100} \right]^2 + \xi \cdot (\text{TT}_{t_{\max},1} - \text{Hot}_{\text{Max},1})^2 \\ J \end{array} \right.$$

5. Поиск экстремума функции двух переменных методом Conjugate Gradient (сопряженных градиентов):

Given

$$1 < a1 < 10$$

$$0.02 < \lambda1 < 0.2$$

$$\text{TC} := \text{Minimize}(\text{SKO}, a1, \lambda1)$$

$$\text{TC}_0 := 4.13 \quad \text{TC}_1 := 0.1921$$

Конец

Таким образом, идентифицированы следующие значения TC: $a_1 = 4,13 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; $\lambda_1 = 0,1921 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$.

На рис. 3.10 и 3.11 представлены результаты работы регуляризирующего алгоритма на основе критерия (3.6) при идентификации

ТС синтетического каучука СКТНФ(С) ($a_1 = 4,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; $\lambda_1 = 0,192 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$).

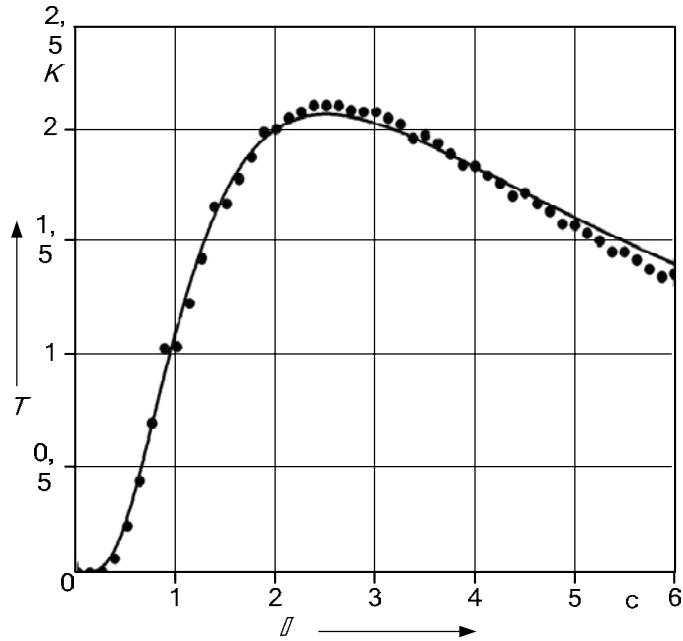


Рис. 3.10. График измеренных и рассчитанных избыточных температур при идентификации ТС каучука СКТНФ(С)

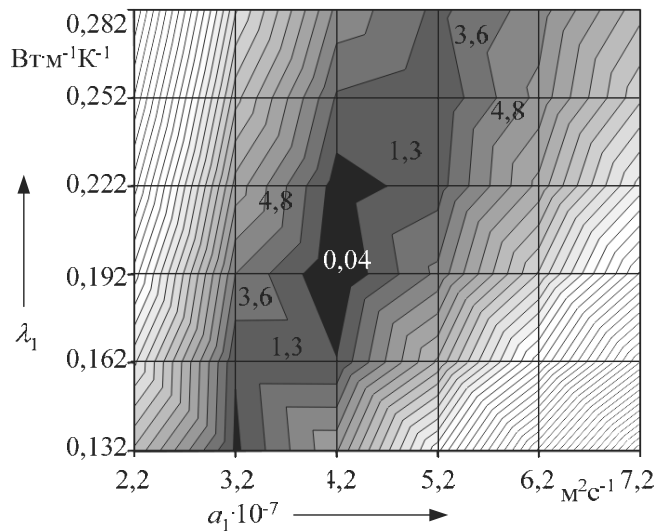


Рис. 3.11. Рельеф функции $J_\xi(a_1, \lambda_1)$ при идентификации ТС каучука СКТНФ(С)

Таким образом, используя полученное разностное решение нелинейной задачи теплопроводности, рассмотрена методика и алгоритм решения коэффициентной задачи итерационно-вариационного типа, адекватный данным натурных экспериментов.

3.5. ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ РЕШЕНИЙ [56]

Непрерывное решение однородных разностных схем с переменным коэффициентом температуропроводности ищется в некотором пространстве возможных значений Δx и $\Delta \tau$, при этом на температуропроводность налагается ограничение [72]:

$$0 < a_{\min} \leq a(T) \leq a_{\max}.$$

Для оценки устойчивости однородных разностных схем с переменными коэффициентами используют выражение [72]:

$$\Delta \tau \leq \frac{\Delta x^2}{2(1 - \eta) a_{\max}},$$

где $\eta = 0, 1/2, 1$, для явной схемы $\eta = 0$.

Тогда для разностных схем двумерной функции Воер2D() и трехмерной Воер3D(·) следует соблюдать условия устойчивости вычислений, соответственно

$$\Delta\tau \leq \frac{\Delta x^2}{4a_{\max}}, \quad \Delta\tau \leq \frac{\Delta x^2}{6a_{\max}},$$

при этом схемы сходятся с точностью не хуже $O(\Delta x^2 + \Delta\tau^2)$. Для расчета температур при $\tau > 10$ с необходимо соблюдать выполнение условия полуограниченности [73]:

$$N/\nu \geq 2. \quad (3.7)$$

На рис. 3.12 приведены графики температур, рассчитанные с помощью функции Воер3D(·) для $\nu\Delta x = 1,85 \cdot 10^{-3}$ м, из которых видно, что график кривой 3 с течением времени накапливает ошибку, связанную с невыполнением условия (3.7).

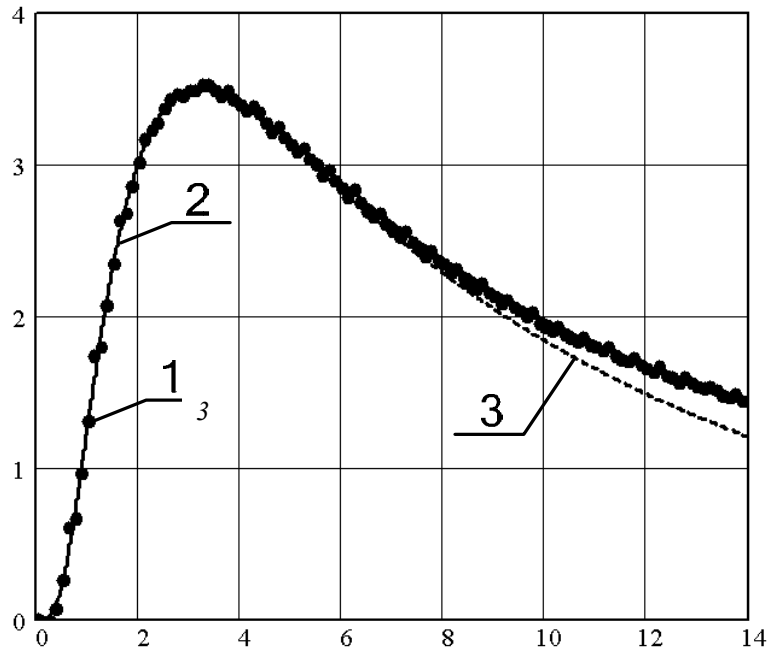


Рис. 3.12. Влияние числа отсчетов N на точность вычислений:
1 – экспериментальная термограмма для КССБ; 2 – $N = 10$; 3 – $N = 8$

Решение обратной коэффициентной задачи на основе невязки (3.3) показало, что функция $J(a_1, \lambda_1)$ не является унимодальной, следовательно, решение неустойчивое. На рис. 3.13, а, б приведена графическая интерпретация решения коэффициентной обратной задачи теплопроводности на основе метода последовательных приближений с использованием невязки (3.3) и функции Воер2D(·). Так, на рис. 3.13, а имеются два локальных минимума: 1 – $J = 0,081$ ТС = $\{3,0 \cdot 10^{-7};$

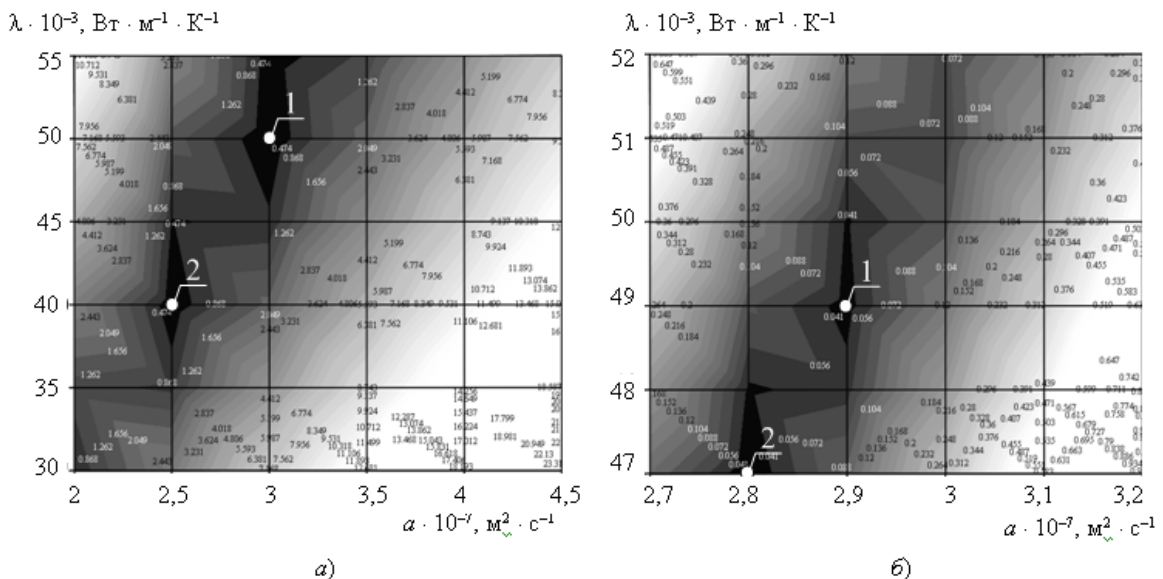


Рис. 3.13. Рельеф функции $J(a_1, \lambda_1)$ при идентификации ТС бетона КССБ:
а) 1 – $J = 0,081$ ТС = $\{3,0 \cdot 10^{-7}; 0,050\}$; 2 – $J = 0,137$ ТС = $\{2,5 \cdot 10^{-7}; 0,040\}$;
б) 1 – $J = 0,032$ ТС = $\{2,9 \cdot 10^{-7}; 0,049\}$; 2 – $J = 0,025$ ТС = $\{2,8 \cdot 10^{-7}; 0,047\}$

0,050}, $2 - J = 0,137$ ТС = $\{2,5 \cdot 10^{-7}; 0,040\}$ для диапазона идентификации ТС по теплопроводности $[0,03; 0,055]$ Вт · м⁻¹ · К⁻¹ и температуропроводности $[2; 4,5] \cdot 10^{-7}$ м² · с⁻¹, однако для диапазона $\lambda = [0,047; 0,052]$ Вт · м⁻¹ · К⁻¹ и $a = [2,7; 3,2] \cdot 10^{-7}$ м² · с⁻¹ локальные минимумы имеют другие значения (рис. 3.15, б): $1 - J = 0,032$ ТС = $\{2,9 \cdot 10^{-7}; 0,049\}$, $2 - J = 0,025$ ТС = $\{2,8 \cdot 10^{-7}; 0,047\}$.

На основе теории регуляризации некорректных задач для идентификации ТС необходимо использовать алгоритм расчета невязки согласно выражению (3.6). Характерной точкой измеряемой избыточной температуры является максимум температуры, поэтому для уменьшения уклонения экспериментальной температурной кривой от рассчитанной по дискретной математической модели вторым и третьим слагаемыми невязки (3.6) являются время и значение уклонения максимума температуры.

Если параметры регуляризации ξ_2 задать как обратную зависимость от T_{\max} , то параметр дополнительно будет играть роль фильтра высокочастотной составляющей измеряемой избыточной температуры при идентификации ТС.

Используя невязку (3.6), были идентифицированы ТС ряда образцов теплоизоляционных материалов по 10 независимым измерениям каждый (прил. Д).

Полученные результаты показывают, что систематическая погрешность идентификации теплопроводности в диапазоне $[0,03; 0,2]$ Вт · м⁻¹ · К⁻¹ не превышает 3,2 %, температуропроводности в диапазоне $[2,8; 4,2] \cdot 10^{-7}$ м² · с⁻¹ – 2,2 %, случайная составляющая погрешности измерений менее 6,2 и 7 %, соответственно, решение коэффициентной задачи на основе невязки (3.6) является устойчивым, так как систематическая погрешность идентификации ТС не превышает инструментальной погрешности измерений температуры с помощью термпар, достигающей 3,5 % [74].

4. ДИСКРЕТНЫЕ МОДЕЛИ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПРИ НАГРЕВЕ ТЕПЛОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Задачи ТНК с точки зрения теории теплопроводности описаны в работах [1 – 3, 36, 72]. Основными параметрами дефектов, влияющими на пространственно-временную структуру температурного поля, являются их ТС, размеры, глубина залегания и ориентация относительно основного теплового потока. При моделировании схемы контроля при одностороннем ТНК учитываются условие теплообмена на внешней поверхности изделия при нагреве внешним источником тепла и охлаждении конвекцией и излучением, а также условие непрерывности температуры и теплового потока на границах сопряжения и на границах твердый слой – газообразный дефект с учетом излучения стенок дефекта [75]. Проверка адекватности численной модели осуществлялась на основе экспериментальных данных с учетом этапов методики (см. рис. 1.4).

4.1. ДИСКРЕТНАЯ МОДЕЛЬ ТРЕХМЕРНОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ИЗОТРОПНОЙ СРЕДЫ

Для решения задачи идентификации СПО как коэффициентной обратной задачи теплопроводности необходимо произвести:

- численное решение нелинейной задачи теплопроводности, при этом тепловое моделирование выполняется на основании результатов экспериментальных исследований;
- моделирование дефекта и численное решение нелинейной задачи теплопроводности с учетом дефекта.

Рассмотрим решение нестационарной задачи теплопроводности с наличием искусственного дефекта, полученное методом конечных разностей.

Трехмерное нестационарное распределение температуры в твердом, непрозрачном, сером, полуограниченном и изотропном теле, нагреваемом посредством импульсного теплового излучения и охлаждаемом за счет конвективного теплообмена с окружающей средой температурой T_0 (рис. 4.1), описывается уравнением (1.8), при этом на поверхности полуограниченного тела одновременно выполняются граничные условия II и III родов:

- процесс импульсного нагревания импульсным потоком посредством теплового излучения (для нагревания $\partial T / \partial x > 0$, тепловой поток отрицательный [39]) описывается выражением [76]

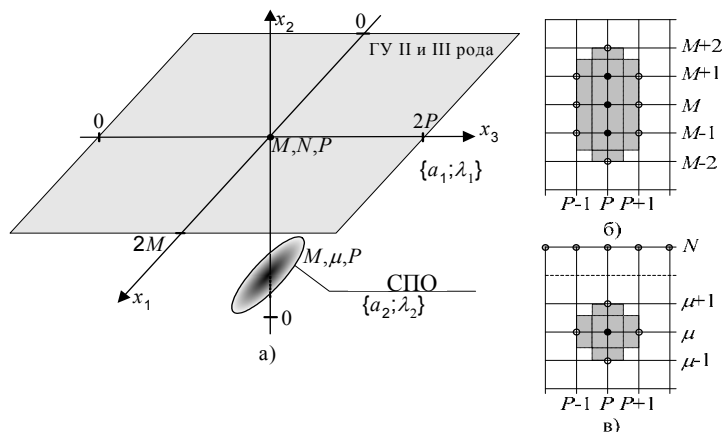


Рис. 4.1. Пространственная модель задачи теплопроводности и объекта

$$-\lambda_1(T) \frac{\partial T_1}{\partial x_2} \Big|_{-0} = -\varepsilon \sigma_0 (T_{\text{н}}^4 - T_{\text{п}}^4) h(\tau - \tau^*) \quad (4.1)$$

или

$$-\lambda_1(T) \frac{\partial T_1}{\partial x_2} \Big|_{-0} = -q(\tau); \quad (4.2)$$

– процесс конвективного теплообмена между поверхностью полуограниченного тела и окружающей средой (в процессе охлаждения $T_{\text{п}} > T_0$ [39]) запишем в виде

$$-\lambda_1(T) \frac{\partial T_1}{\partial x_2} \Big|_{-0} = \alpha(T_{\text{п}} - T_0), \quad (4.3)$$

где ε – интегральная степень черноты серого тела; σ_0 – постоянная Стефана – Больцмана; $T_{\text{н}}$ – температура поверхности излучателя; $T_{\text{п}}$ – температура поверхности полуограниченного тела; $h(\cdot)$ – ступенчатая функция.

Запишем граничные условия на основании (4.2) и (4.3) и с учетом, что $T_0 = 0$, в общем виде:

$$-\lambda_1(T) \frac{\partial T_1}{\partial x_2} \Big|_{-0} - \alpha T_{\text{п}} = -q(\tau). \quad (4.4)$$

Расчет сеточной модели производится в пространственной сетке размерами $2M \times N \times 2P$. Граничные условия выполняются на плоскости $\overline{x_2 = N}$. Прогонки производят по оси x_1 в точках $m = \overline{1, 2M-1}$, по оси x_2 в точках $n = \overline{1, N-1}$, по оси x_3 в точках $p = \overline{1, 2P-1}$ с шагом Δx и с шагом по времени $\Delta \tau$ в интервале $k = \overline{0, K}$ (рис. 4.1, а).

Примем начальное условие: $T(x_1, x_2, x_3, \tau)|_{\tau=0} = T_0 = 0$.

Используя метод теплового баланса [40], выражение (4.4) в соответствии с (1.14) и введенной системой координат запишем в разностной форме:

$$-\lambda_1 \left(\frac{T_p^k - T_{p+1}^k}{2} \right) \frac{T_p^k - T_{p+1}^k}{\Delta x} - \alpha (T_p^k) T_p^k = -q(k\Delta\tau) + \frac{\lambda_1(T_p^k) \Delta x}{2a_1(T_p^k)} \frac{T_p^{k+1} - T_{p+1}^k}{\Delta\tau}.$$

Следовательно, расчет граничных условий производится на основании выражений:

при $\tau \leq \tau^*$

$$T_{m,N,p}^{k+1} = \frac{2qa_1(T_{m,N,p}^k) \Delta\tau}{\lambda_1(T_{m,N,p}^k) \Delta x} + \left(1 - \frac{2\alpha a_1(T_{m,N,p}^k) \Delta\tau}{\lambda_1(T_{m,N,p}^k) \Delta x} \right) T_{m,N,p}^k - \frac{2a_1(T_{m,N,p}^k) \Delta\tau}{\lambda_1(T_{m,N,p}^k) \Delta x^2} \lambda_1 \left(\frac{T_{m,N,p}^k + T_{m,N-1,p}^k}{2} \right) (T_{m,N,p}^k - T_{m,N-1,p}^k);$$

при $\tau > \tau^*$

$$T_{m,N,p}^{k+1} = \left(1 - \frac{2\alpha a_1(T_{m,N,p}^k) \Delta\tau}{\lambda_1(T_{m,N,p}^k) \Delta x} \right) T_{m,N,p}^k - \frac{2a_1(T_{m,N,p}^k) \Delta\tau}{\lambda_1(T_{m,N,p}^k) \Delta x^2} \lambda_1 \left(\frac{T_{m,N,p}^k + T_{m,N-1,p}^k}{2} \right) (T_{m,N,p}^k - T_{m,N-1,p}^k),$$

$m = \overline{1, 2M-1}$, $p = \overline{1, 2P-1}$, а q и α отнесены к единице площади поперечного сечения пространственной сетки и выражены в Вт · м⁻² и Вт · м⁻² · К⁻¹.

Далее применяют уравнения для искомой сеточной функции $T_{m,n,p}^{k+1}$ «прогонками вдоль осей x_1, x_2, x_3 », соответствующей температуре на $(k+1)$ -м временном слое [44]:

$$T_{m,n,p}^{k+1} = \left(1 - \frac{6\Delta\tau a_i(T_{m,n,p}^k)}{\Delta x^2} \right) T_{m,n,p}^k + \frac{\Delta\tau}{\Delta x^2} (a_i(T_{m+1,n,p}^k) T_{m+1,n,p}^k + a_i(T_{m-1,n,p}^k) T_{m-1,n,p}^k + a_i(T_{m,n+1,p}^k) T_{m,n+1,p}^k + a_i(T_{m,n-1,p}^k) T_{m,n-1,p}^k + a_i(T_{m,n,p+1}^k) T_{m,n,p+1}^k + a_i(T_{m,n,p-1}^k) T_{m,n,p-1}^k) \quad (4.5)$$

при $i = 1$, $m = \overline{1, 2M-1}$, $n = \overline{1, N-1}$, $p = \overline{1, 2P-1}$.

Для приближенного решения нелинейной задачи используется кусочно-линейная аппроксимация зависимости ТС от температуры (2.10).

Эксперименты показали, что аппроксимирующая функция источника теплоты должна учитывать инерционность ИК-излучателя, а также охлаждение поверхности моделируемого тела излучением.

Для аппроксимации инерционности выделения теплового потока применяется экспоненциальная функция (1.15) (рис. 4.2).

Охлаждение поверхности моделируемого тела излучением учитывается с помощью выражения

$$E_c = \varepsilon T_{\text{п}}^4 \sigma_0.$$

Данный алгоритм реализован в виде функции RADheatI(a_1, λ_1) как Dynamic Linked Library (DLL) для использования в среде математического моделирования MathCAD.

Рассмотрим численную модель скрытого объекта с теплофизическими свойствами a_2, λ_2 , протянувшегося от точки $[M-1, \mu, P]$ к точке $[M+1, \mu, P]$, где μ – координата СПО по оси x_2 (рис. 4.1).

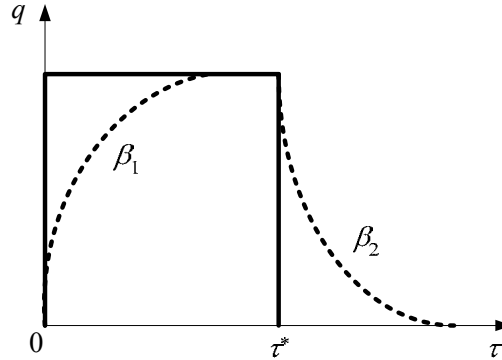


Рис. 4.2. Вид функции источника теплоты

Значения температур в точках $[M \pm 1, \mu, P]$ и $[M, \mu, P]$ рассчитываются на основании (4.5) при $i = 1$ и $3 \leq \mu \leq N-2$. В точках, прилегающих к данным, сеточные уравнения получают на основании теплового баланса: сумма тепловых потоков, втекающих в элементарную ячейку и вытекающих из нее, равна нулю. Так, в точке $[M+2, \mu, P]$ (рис. 4.1, б) сеточное уравнение имеет вид:

$$T_{M+2, \mu, P}^{k+1} = \frac{(\lambda_1(T_{M+3, \mu, P}^{k+1}) + \lambda_1(T_{M+2, \mu, P}^{k+1})) T_{M+3, \mu, P}^k}{\lambda_1(T_{M+3, \mu, P}^{k+1}) + 2\lambda_1(T_{M+2, \mu, P}^{k+1}) + \lambda_2(T_{M+1, \mu, P}^{k+1})} + \frac{(\lambda_2(T_{M+1, \mu, P}^{k+1}) + \lambda_1(T_{M+2, \mu, P}^{k+1})) T_{M+1, \mu, P}^{k+1}}{\lambda_1(T_{M+3, \mu, P}^{k+1}) + 2\lambda_1(T_{M+2, \mu, P}^{k+1}) + \lambda_2(T_{M+1, \mu, P}^{k+1})},$$

а в точке $[M+1, \mu-1, P]$ (рис. 4.1, б, в):

$$T_{M+1, \mu-1, P}^{k+1} = \frac{\lambda_1(T_{M+1, \mu-2, P}^{k+1}) + \lambda_1(T_{M+1, \mu-1, P}^{k+1})}{\Xi} T_{M+1, \mu-2, P}^k + \frac{\lambda_2(T_{M+1, \mu, P}^{k+1}) + \lambda_1(T_{M+1, \mu-1, P}^{k+1})}{\Xi} T_{M+1, \mu, P}^{k+1} + \frac{\lambda_1(T_{M+1, \mu-1, P+1}^{k+1}) + \lambda_1(T_{M+1, \mu-1, P}^{k+1})}{\Xi} T_{M+1, \mu-1, P+1}^{k+1} + \frac{\lambda_2(T_{M+1, \mu-1, P-1}^{k+1}) + \lambda_1(T_{M+1, \mu-1, P}^{k+1})}{\Xi} T_{M+1, \mu-1, P-1}^{k+1},$$

где

$$\Xi = \lambda_1(T_{M+1, \mu-2, P}^{k+1}) + 4\lambda_1(T_{M+1, \mu-1, P}^{k+1}) + \lambda_2(T_{M+1, \mu, P}^{k+1}) + \lambda_1(T_{M+1, \mu-1, P+1}^{k+1}) + \lambda_1(T_{M+1, \mu-1, P-1}^{k+1}).$$

Совместив алгоритм функции RADheatI(a_1, λ_1) с алгоритмом расчета температурного поля в полуограниченном материале с учетом дефекта для математического пакета MathCAD, разработана функция RADheat($a_1, \lambda_1, a_2, \lambda_2$). Используя эту функцию, можно рассчитать:

– ошибку моделирования дефекта, связанную с конечно-разностной аппроксимацией:

$$\Delta = \text{RADheat}(a_1, \lambda_1, a_2, \lambda_2) \Big|_{\substack{a_2=a_1 \\ \lambda_2=\lambda_1}} - \text{RADheatI}(a_1, \lambda_1);$$

– температурное поле на поверхности полуограниченного тела с объектом для заданных значений параметров модели $q, \alpha, \mu, \Delta x, \Delta \tau, \tau^*, M, N, P, K_a, K_\lambda$ и времени моделирования K :

$$T(x_1, x_3) = \text{RADheat}(a_1, \lambda_1, a_2, \lambda_2) - \Delta;$$

– дифференциальную термограмму между температурным полем, полученную для полуограниченного тела без СПО и тела с объектом:

$$D(x_1, x_3) = T(x_1, x_3) - \text{RADheatI}(a_1, \lambda_1),$$

или

$$D(x_1, x_3) = \text{RADheat}(a_1, \lambda_1, a_2, \lambda_2) - \text{RADheat}(a_1, \lambda_1, a_2, \lambda_2) \Big|_{\substack{a_2=a_1 \\ \lambda_2=\lambda_1}}. \quad (4.6)$$

Входные данные специализированной функции RADheat(·):

$$\text{RADheat} \left(\begin{pmatrix} a_1 & a_2 & E & m, p \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \alpha & K_\alpha \\ K_{1a} & K_{2a} & K_{3a} & K_a \\ K_{1\lambda} & K_{2\lambda} & K_{3\lambda} & K_\lambda \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} N & \tau^* \\ K & u \\ \Delta x & \beta_1 \\ \tau_0^* & \mu \\ \Delta \tau & \beta_2 \end{pmatrix} \right), \quad (4.7)$$

где $a_2(T) = \tilde{a}_2(1 + K_a T)$; $\lambda_2(T) = \tilde{\lambda}_2(1 + K_\lambda T)$; u – переменная управления выходными данными; τ_0^* – время начала теплового воздействия, с; m, p – координата точки на плоскости $x_2 = N$, для которой функция RADheat(·) генерирует массив данных в соответствии с выражением (2.6) при $u = 0$.

Выходными данными могут быть: $u = 0$, массив (2.6); $u = 1$, массив вида (2.7) значений избыточных температур на поверхности полуограниченного материала; $u = 2$ или 3 – массивы вида (2.7) значений избыточных температур в плоскостях (m, μ, p) и (m, n, P) , соответственно.

4.2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для численного эксперимента были установлены следующие значения параметров дискретной модели: $a_1 = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; $\lambda_1 = 0,5 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$; $\Delta x = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $q = 1 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$; $\Delta \tau = 50 \text{ мс}$; $\tau_0^* = 0 \text{ с}$; $\tau^* = 1 \text{ с}$; $\alpha = 1 \cdot 10^{-4} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$, $M = N = P = 10$; $K_{1a} = -0,001 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$; $K_{2a} = -0,01 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$; $K_{3a} = -0,05 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$; $K_{1\lambda} = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$; $K_{2\lambda} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$; $K_{3\lambda} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$, $K = 50$.

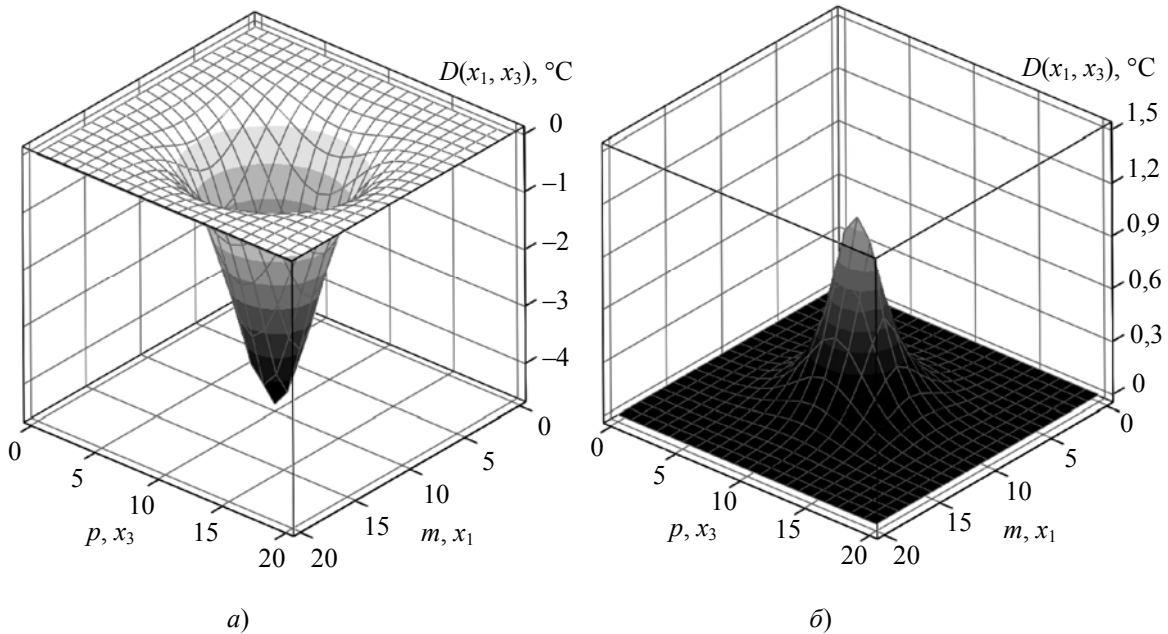


Рис. 4.3. Пространственные графики дифференциальных термограмм для момента времени $K\Delta\tau = 2,5 \text{ с}$

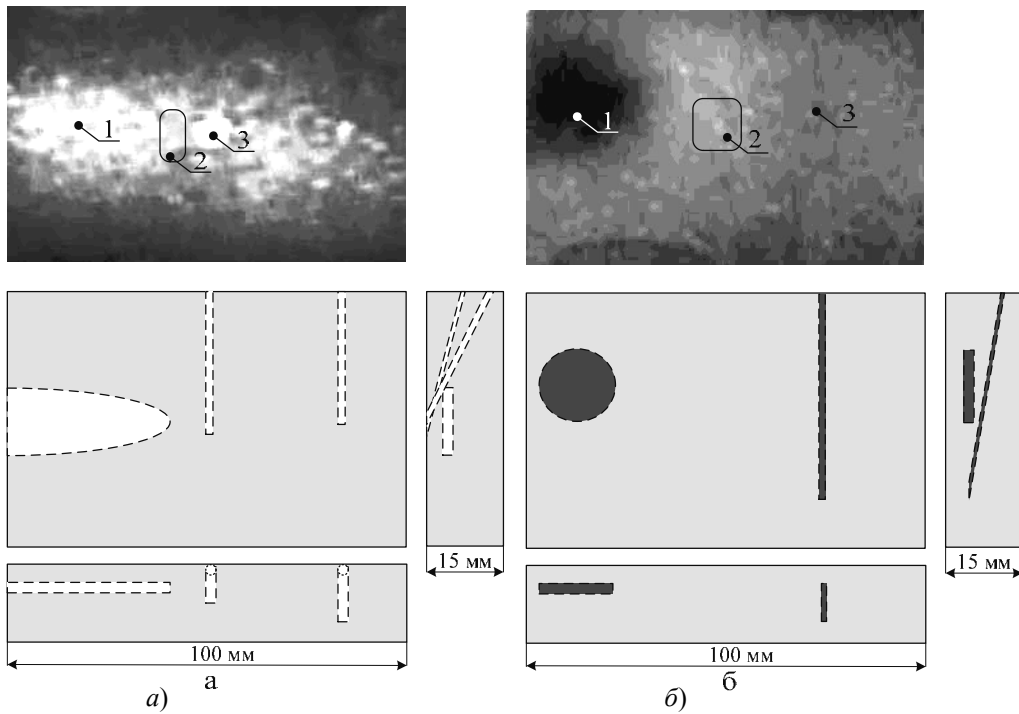


Рис. 4.4. Термограммы экспериментального исследования пенополиуретана (ППУ) с искусственными дефектами:
a – с объектами в виде пустот, значения температур в точках: 1 – 3,9 °С; 2 – 32,4 °С; 3 – 34,0 °С;
б – с объектами в виде металлических включений, значения температур в точках: 1 – 28,7 °С; 2 – 30,5 °С; 3 – 30,1 °С

На рис. 4.3, *a* представлена дифференциальная термограмма при $a_2 = 0,2a_1$; $\lambda_2 = 1,2\lambda_1$; $\mu = 7$, что соответствует дефекту из теплопроводного материала и подтверждается практическими исследованиями по выявлению дефектов типа пустот с помощью тепловизоров [3, 8], на рис. 4.3, *б* – при $a_2 = 1,2a_1$; $\lambda_2 = 0,2\lambda_1$; $\mu = 7$, что соответствует СПО из теплоизоляционного материала.

Для определения величин температурных перепадов, возникающих над областью объекта, с помощью компьютерного термографа ИРТИС-2000 и инфракрасного излучателя типа УИК-1000 (кварцевая трубка с углеводородным волокном) были исследованы образцы из пенополиуретана с искусственными СПО в виде пустот (рис. 4.4, *a*), и в виде металлических включений (рис. 4.4, *б*). Экспериментально определены значения температурных перепадов в точках 1 и 3 (рис. 4.4, *a*), равные 1,5 °С и 1,6 °С, а в точках 1 и 3 (рис. 4.4, *б*) –1,8 и –0,4 °С, что качественно подтверждает результаты численного моделирования (рис. 4.3).

Анализ численного решения с наличием искусственного скрытого объекта показал, что на его основе становится возможным решение задачи тепловой томографии (обнаружение СПО в структуре основного материала):

- с использованием многофакторных функций преобразования (МФП) по трем параметрам a_2 , λ_2 , μ : $\text{МФП}_{\tau_{\max \min}}^{a_2, \lambda_2, \mu}$,

$\text{МФП}_{T_{\max \min}}^{a_2, \lambda_2, \mu}$, полученных для экстремума дифференциальной термограммы $D(x_1, x_3)$ [48];

- с использованием минимизации среднеквадратичного функционала [34]

$$\left\{ J(a_2, \lambda_2, \mu) = \frac{1}{\tau_e} \int_0^{\tau_e} (D(\tau; a_2, \lambda_2, \mu) - \tilde{D}(\tau))^2 d\tau \right\} = \min, \quad (4.8)$$

где $\tilde{D}(\tau)$ – значения дифференциальной термограммы реального испытания; $D(\tau; a_2, \lambda_2, \mu)$ – значения дифференциальной термограммы, рассчитанные с использованием математической модели; τ_e – время испытаний.

Таким образом, на основе разностных схем трехмерной нелинейной задачи теплопроводности с учетом скрытых объектов и нагрева поверхности материала тепловым излучением становится возможным решение задачи обнаружения СПО путем идентификации их ТС.

4.3. АЛГОРИТМ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ МЕТОДОМ ФИКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ

Трудности составления программ для численного решения краевой задачи (1.8) (1.10) с учетом СПО зависят от геометрии моделируемых областей G_1 и G_2 . Практическое применение трехмерной модели показало, что при обработке данных тепловизионных приборов алгоритм коэффициентной задачи требует порядка терра операций, следовательно, является неэффективным при решении оперативных задач по обнаружению и распознаванию подповерхностных объектов, скрытых слоем грунта.

Рассмотрим одномерное решение нестационарной задачи теплопроводности на основе метода фиктивных областей [77]. Допустим, скрытый объект (рис. 4.1) находится в объеме $[\pm\infty, \mu_1, \pm\infty] - [\pm\infty, \mu_2, \pm\infty]$, тогда трехмерную задачу теплопроводности при нагреве излучением (п. 4.1) можно рассмотреть в одномерном пространстве как задачу для трехслойной неограниченной пластины, в которой:

- на поверхности первой пластины в точке $x_2 = 0$ выполняются граничные условия (4.4);

- в точках сопряжения пластин $x_2 = \mu_i$, $i \in \overline{1, 2}$, действуют граничные условия (2.9);
- на поверхности третьей пластины в точке $x_2 = N$ ($N \gg \mu_2 > \mu_1$) выполняются граничные условия первого рода $T_N(\tau) = 0$;
- тепловые свойства первой и третьей пластин одинаковы и равны a_1, λ_1 ;
- тепловые свойства второй пластины толщиной $\mu_2 - \mu_1$ равны a_2, λ_2 .

Рассмотрим алгоритм расчета для избыточных значений температур.

Шаг 1. Используются начальное условие $T(x, \tau)|_{\tau=0} = T_0 = 0$ и граничное $T(x, \tau)|_{x=N} = 0$.

Шаг 2. Расчет разностного решения T_n^k для каждого шага по времени. Сначала вычисляется промежуточная сеточная функция для граничных условий (4.4):

$$T_0^k = \left(1 - \frac{2\Delta\tau a_1(T_0^k)\alpha(T_0^k)}{\Delta x \lambda_1(T_0^k)}\right) T_0^k - \frac{2\Delta\tau a_1(T_0^k)\lambda_1[(T_0^k - T_1^k)/2]}{\Delta x \lambda_1(T_0^k)} \frac{T_0^k - T_1^k}{\Delta x};$$

$$T_0^{k+1} = T_0^{k+1} + 2\Delta\tau \left[\left(1 - \exp\left(-\frac{k\Delta\tau}{\beta_1}\right)\right) E - (T_0^k)^4 \sigma_0 \right] \frac{a_1(T_0^k)}{\Delta x \lambda_1(T_0^k)} \quad \text{при } \tau \leq \tau^*;$$

$$T_0^{k+1} = T_0^{k+1} + 2\Delta\tau \left[\exp\left(-\frac{k\Delta\tau - \tau^*}{\beta_2}\right)\right] E - (T_0^k)^4 \sigma_0 \left] \frac{a_1(T_0^k)}{\Delta x \lambda_1(T_0^k)} \quad \text{при } \tau > \tau^*;$$

далее методом прогонки для каждой точки пространства вычисляют температуру на $(k+1)$ -м временном слое согласно (1.13):

$$T_n^{k+1} = \left(1 - \frac{2\Delta\tau a_i(T_n^k)}{\Delta x^2}\right) T_n^k + \frac{\Delta\tau}{\Delta x^2} [T_{n-1}^k a_i(T_{n-1}^k) + T_{n+1}^k a_i(T_{n+1}^k)],$$

$$a_i = \begin{cases} a_1, & n \in [1, \mu_1) \cup (\mu_2, N-1]; \\ a_2, & n \in [\mu_1, \mu_2] \end{cases}$$

при $n = \overline{1, N-1}$.

Шаг 3. Уточнение температур в точках сопряжения.

Шаги 2, 3 повторяются для $k = 1, 2, \dots, K$.

Данный алгоритм реализован в виде функции RHL(·) как Dynamic Linked Library (DLL) для использования в среде математического моделирования MathCAD.

Входные данные специализированной функции RHL(·):

$$\text{RHL} \left(\left(\begin{array}{cccc} a_1 & a_2 & K_a & \alpha \\ \lambda_1 & \lambda_2 & K_\lambda & K_\alpha \\ K_{1a} & K_{2a} & K_{3a} & E \\ K_{1\lambda} & K_{2\lambda} & K_{3\lambda} & \alpha_s^* \end{array} \right), \left(\begin{array}{ccc} \tau_0^* & \beta_1 & \mu_1 \\ \tau^* & \beta_2 & \mu_2 \\ N & \Delta x & u_1 \\ K & \Delta\tau & u_2 \end{array} \right) \right), \quad (4.9)$$

где u_1 – переменная управления выходными данными; u_2 – переменная управления моделью, при $u_2 \neq 0$ в модели принимается условие $a_2 = a_1, \lambda_2 = \lambda_1$.

Выходными данными могут быть: $u_1 = 0$, массив (2.6); $u_1 = 1$, массив значений температур в каждой точке $n = \overline{0, N}$ в момент времени K .

На рис. 4.5 приведены графики изменения избыточных температур от времени, рассчитанные функцией RHL(·) для двух модельных ситуаций: 1 – в кварцевом песке ($a_1 = 5,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; $\lambda_1 = 0,814 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$) на глубине 0,8 см находится теплоизоляционный материал – полиспен ($a_2 = 1 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; $\lambda_2 = 0,028 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$) толщиной 1,2 см; 2 – в кварцевом песке на глубине 0,8 см находится теплопроводящий материал – железо ($a_2 = 60 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; $\lambda_2 = 48 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$) толщиной 1,2 см; 3 – без скрытого в песке материала. Время теплового воздействия 50 с.

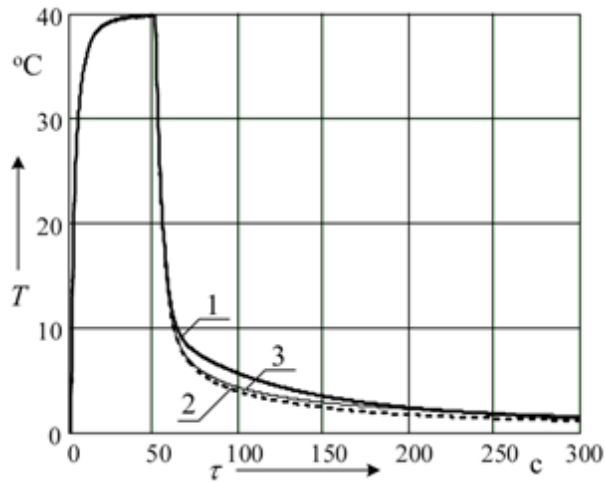


Рис. 4.5. Избыточные термограммы, рассчитанные с помощью функции $RHL(\cdot)$

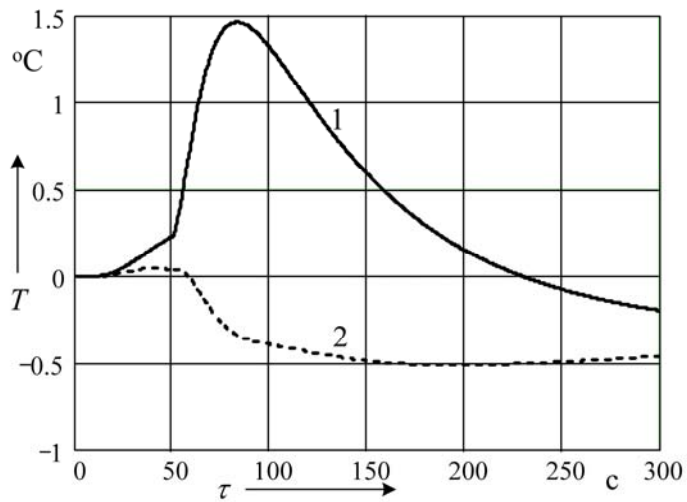


Рис. 4.6. Дифференциальные термограммы, рассчитанные с помощью функции $RHL(\cdot)$

Графики изменения дифференциальных термограмм на поверхности песка от времени, рассчитанные как разница избыточных температур при наличии скрытого объекта и без него для полиспена (1) и железа (2) приведены на рис. 4.6.

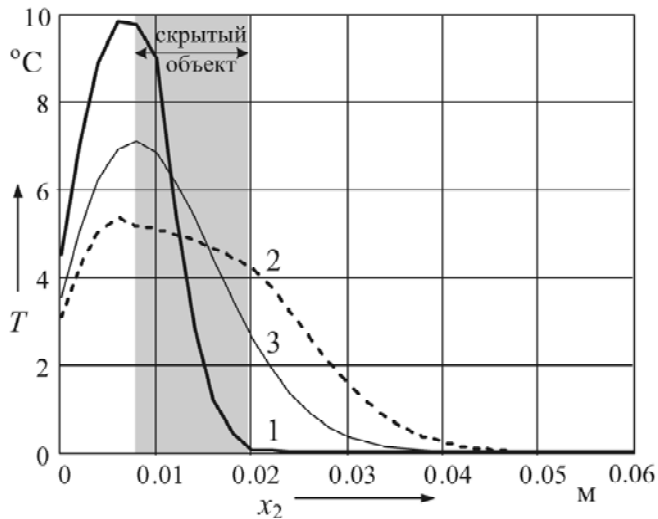


Рис. 4.7. Распределение избыточных температур по глубине грунта

Из анализа графиков следует, что для скрытых объектов, выполненных из теплопроводящих материалов, дифферен-

циальная термограмма отрицательная, а для теплоизоляционных – положительная, однако с течением времени данная термограмма также переходит в область отрицательных значений.

На рис. 4.7 представлены графики распределения температур в кварцевом песке по глубине прогрева в момент времени 120 с после начала теплового воздействия. Графики показывают, что скрытый объект из теплоизоляционного материала оказывает тепловое сопротивление потоку, а из теплопроводящего, наоборот, способствует более быстрому распространению потока вглубь кварцевого песка.

5. ИДЕНТИФИКАЦИЯ СВОЙСТВ СКРЫТЫХ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО ИХ ТЕПЛОВОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ

Проблемы теплового неразрушающего контроля, и в частности дефектоскопии и томографии, привлекают все возрастающее внимание специалистов, разрабатывающих и применяющих различные средства и системы термографического анализа в науке и технике. Это быстро развивающееся направление пока еще сдерживается недостаточным уровнем моделирования тепловых процессов и методов обнаружения дефектов в процессе автоматизированного теплового неразрушающего контроля, пригодных для использования на практике.

Задача тепловой динамической томографии направлена на послойное представление структуры материала (грунта) и скрытых в нем объектов по их ТС. Следовательно, задача идентификации свойств подповерхностного объекта должна решаться как частная в более общей задаче тепловой томографии в ИК-диапазоне волн.

5.1. МЕТОД И АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ СКРЫТЫХ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ОБЪЕКТОВ

Задача идентификации свойств СПО подобна задаче идентификации ТС материалов с разрывными коэффициентами с той лишь разницей, что дискретная модель должна учитывать наличие подповерхностного объекта, а итерационно-вариационная задача решается для дифференциальных термограмм между температурными полями, полученными для тела без скрытого объекта и тела с объектом.

Для решения задачи идентификации свойств подповерхностных объектов возможна следующая реализация оптико-электронной системы (ОЭС) ИК-диапазона волн [46]:

- установка состоит из бесконтактного нагревателя, который импульсно или постоянным нагревом воздействует на участок поверхности, и радиометра (тепловизора), регистрирующего распространение изотерм (рис. 5.1);
- пассивное устройство, в котором в качестве нагревателя используется энергия солнца – естественный нагрев земной поверхности.

Активное устройство (рис. 5.1) содержит инфракрасный нагреватель 1 и прибор инфракрасной термографии 2. Инфракрасный нагреватель 1 в течение заданного времени τ^* равномерно воздействует по всей площади поверхности грунта 3 размером $2M \times 2P$ (согласно трехмерной дискретной модели, гл. 4), а с помощью прибора инфракрасной термографии 2 в интервале времени $[\tau_1, \tau_2]$ во всех точках поверхности грунта 3 с размерами $2M \times 2P$ измеряют избыточные значения температур. Для тех точек поверхности грунта, в которых дифференциальная термограмма не равна нулю из-за наличия скрытого под поверхностью грунта объекта 4, решают задачу идентификации тепловых свойств скрытого объекта и глубины его залегания.

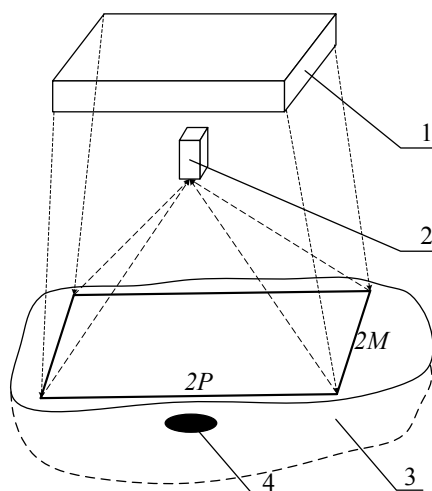


Рис. 5.1. Схема оптико-электронной системы идентификации свойств подповерхностных объектов

Предлагается реализация элементов ОЭС на базе решения обратной коэффициентной задачи теплопроводности в соответствии со следующим алгоритмом:

- численное решение нелинейной задачи теплопроводности, при этом тепловое моделирование выполняется на основании результатов экспериментальных исследований [30];

- моделирование СПО и численное решение нелинейной задачи теплопроводности с учетом скрытого объекта [34];
- решение обратной коэффициентной задачи теплопроводности в вариационной постановке [31, 63];
- выработка критерия обнаружения объекта на основе идентификации его параметров: тепловых свойств и глубины залегания [34, 78].

При идентификации свойств СПО, с учетом разрешающей способности приемника излучения, формируется его трехмерный образ во всей области моделируемого участка грунта с размерами $2M \times N \times 2P$, который состоит из совокупности отдельных точек, для каждой из которых идентифицированы значения ТС (теплопроводности λ , температуропроводности a) и глубины залегания μ . На рис. 5.2 схематично показана трехмерная реконструкция элементов скрытого объекта: 1 – моделируемый объем грунта, 2 – реконструированное отображение элементов СПО, состоящего из отдельных точек моделируемого объема, каждой из которых поставлено в соответствие идентифицированное значение $\{\hat{a}, \hat{\lambda}, \hat{\mu}\}_i$, i – порядковый номер.

На основании трехмерной реконструкции скрытого объекта определяют его размеры и среднюю глубину залегания, а, вычисляя среднее значение его ТС, классифицируют как: металл, пластмасса (рис. 1.8).

Результаты предварительных экспериментов показали, что при мощности теплового потока 150 Вт/м^2 и времени $\tau^* = 60$ с максимальное значение избыточной температуры для класса теплоизоляционных материалов составляет $50 \dots 120 \text{ }^\circ\text{C}$, что требует необходимости учета нелинейной зависимости изменения ТС материала от температуры.

Для обеспечения высокой воспроизводимости при каждом измерении на основании закона Ламберта угол наблюдения для металлов должен быть $0 \dots 40^\circ$, а для диэлектриков в интервале $0 \dots 60^\circ$ [5]. Инфракрасный излучатель должен быть расположен параллельно грунту строго на определенной высоте для обеспечения заданного значения мощности теплового потока.

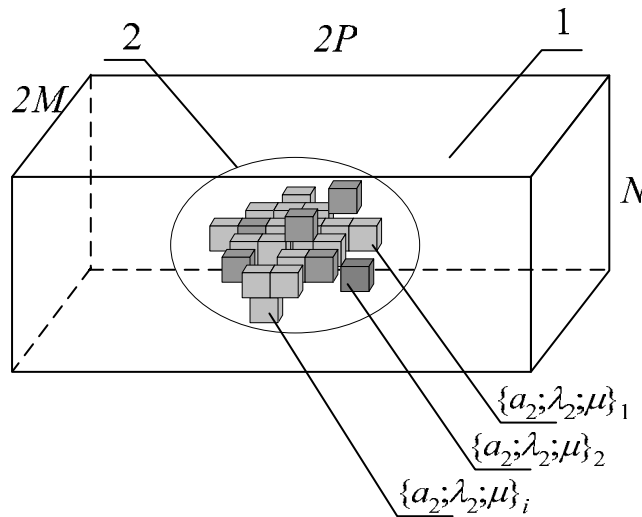


Рис. 5.2. Тепловая томограмма скрытого подповерхностного объекта

Для учета возникновения вынужденной конвекции при проведении измерений в полевых условиях коэффициент теплоотдачи α может быть записан как функция от нормированной скорости ϑ ветра [79]:

$$\alpha(\vartheta) = \alpha_0 + 4\sqrt{\vartheta}.$$

Опико-электронная система идентификации свойств подповерхностного объекта может быть реализована в виде активного устройства или пассивного. В первом случае устройство состоит из инфракрасного нагревателя, который воздействует на участок поверхности и тепловизора, регистрирующего распространение изотерм, при этом чувствительность измерения температуры должна быть не ниже $0,02 \text{ K}$. Во втором случае в качестве нагревателя используется энергия солнца – естественный нагрев земной поверхности.

Рассмотрим вариант алгоритма идентификации свойств СПО на основе одномерной дискретной математической модели задачи теплопроводности при нагреве тепловым излучением (рис. 5.3).

Блок 1. Задание параметров дискретной модели (ДМ) в соответствии с (4.9). Фиксированные параметры модели ($\hat{\psi}_1, \dots, \hat{\psi}_M$, согласно этапу 2, рис. 1.4): Δx , Δt , N , K , τ_0^* , τ^* , a_1 , λ_1 , μ_2 задаются исходя из геометрических размеров моделируемого объема грунта, времени нагрева и измерения температуры на поверхности грунта, а также условий устойчивости (п. 3.5). Параметры ($\hat{\psi}_{M+1}, \dots, \hat{\psi}_{M+2}$): E , α , K_a , K_λ , K_a , K_{ja} , $K_{j\lambda}$, $\beta_{1,2}$ отражают характеристики физической модели и идентифицируются экспериментально по эталонной модели грунт – СПО, аналогично алгоритму идентификации коэффициентов дискретной модели, представленному в прил. Г.

Блоки 2, 7. Организация цикла считывания термограмм $\tilde{T}(k)$, записанных тепловизионным приемником (ТПВП) в заданном интервале времени по осям $n_1 = 0, 1, \dots, N_1$, $n_2 = 0, 1, \dots, N_2$ с шагом дискретизации, соответствующим пространственному разрешению ТПВП.

Блок 3. Формирование невязки на основании (4.9):

- для $u_2 \neq 0$ (идентификация ТС грунта):

$$\begin{aligned}
\left\{ J_1(n_1, n_2; a_1, \lambda_1) = \sum_{k=0}^K (T(n_1, n_2, k; a_1, \lambda_1) - \tilde{T}(n_1, n_2, k))^2 + \right. \\
+ \xi_1 \sum_{k=0}^K \left[\frac{T(n_1, n_2, k; a_1, \lambda_1) - T(n_1, n_2, k-1; a_1, \lambda_1)}{\Delta\tau} - \frac{\tilde{T}(n_1, n_2, k) - \tilde{T}(n_1, n_2, k-1)}{\Delta\tau} \right]^2 + \\
\left. + \xi_2 (T(n_1, n_2; a_1, \lambda_1)_{\max} - \tilde{T}(n_1, n_2)_{\max})^2 \right\} \rightarrow \min \quad (5.1)
\end{aligned}$$

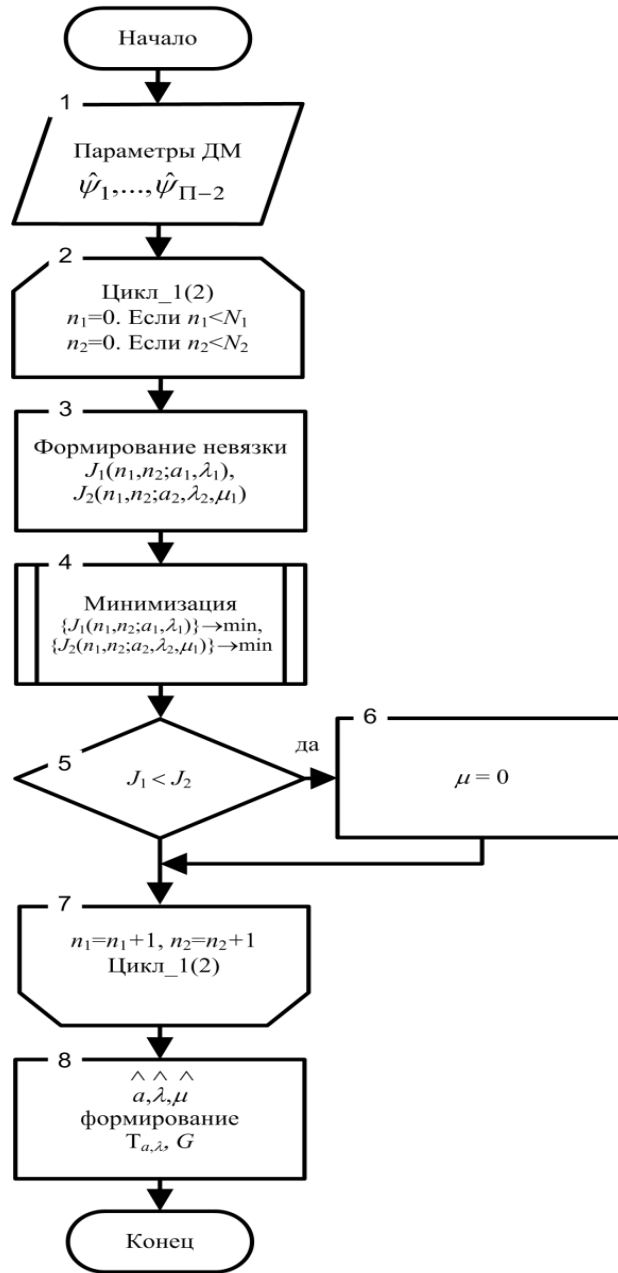


Рис. 5.3. Алгоритм идентификации свойств СПО

при ограничениях $0 > a_{\min} > a_1 > a_{\max}$, $0 > \lambda_{\min} > \lambda_1 > \lambda_{\max}$;

- для $u_2 = 0$ (идентификация неизвестных параметров СПО a_2, λ_2, μ_1) запишем функционал как

$$\begin{aligned}
\left\{ J_2(n_1, n_2; a_2, \lambda_2, \mu_1) = \sum_{k=0}^K (T(n_1, n_2, k; a_2, \lambda_2, \mu_1) - \tilde{T}(n_1, n_2, k))^2 + \right. \\
+ \xi_1 \sum_{k=0}^K \left[\frac{T(n_1, n_2, k; a_2, \lambda_2, \mu_1) - T(n_1, n_2, k-1; a_2, \lambda_2, \mu_1)}{\Delta\tau} - \right. \\
\left. \left. \frac{\tilde{T}(n_1, n_2, k) - \tilde{T}(n_1, n_2, k-1)}{\Delta\tau} \right]^2 + \right. \\
\left. + \xi_2 (T(n_1, n_2; a_2, \lambda_2, \mu_1)_{\max} - \tilde{T}(n_1, n_2)_{\max})^2 \right\} \rightarrow \min \quad (5.2)
\end{aligned}$$

при ограничениях $0 > a_{\min} > a_2 > a_{\max}$, $0 > \lambda_{\min} > \lambda_2 > \lambda_{\max}$, $0 < \mu_1 < \mu_2$.

Блок 4. Поиск экстремумов функционалов (5.1) и (5.2) методом сопряженных градиентов. В результате численного

решения задачи функциональной оптимизации получают численные оценки $\hat{a}_1, \hat{\lambda}_1$ для случая, если в ДМ (4.9) $u_2 \neq 0$, и $\hat{a}_2, \hat{\lambda}_2, \hat{\mu}_1$ – в случае расчетов с учетом СПО ($u_2 = 0$).

Блоки 5, 6. В случае, если по результатам минимизации критериев (5.1) и (5.2) $J_1 < J_2$, выбирается гипотеза об отсутствии СПО и, соответственно, идентифицированные $\hat{a}_1, \hat{\lambda}_1$ отражают ТС грунта, а $\hat{\mu}_1$ приравняется нулю. В противоположном случае принимается решение о наличии СПО с параметрами $\hat{a}_2, \hat{\lambda}_2, \hat{\mu}_1$.

Блок 8. На основании идентифицированных ТС в каждой точке (n_1, n_2) формируются изображения тепловых томограмм $T_{a,\lambda}$ и глубинограммы G .

Исследования по обнаружению подповерхностных объектов проводились на основе модельной сцены: пенополиуретан – модель грунта; скрытые объекты – воздушные пустоты (рис. 4.4, а) металлический диск $\varnothing 18$ мм, проволока $\varnothing 1$ мм (рис. 4.4, б) [46].

Применение алгоритма при обработке данных эксперимента (п. 4.2, рис. 4.4) показало, что тепловой контраст $\Delta T = |\bar{T}_{фон} - \bar{T}_{об}|$, по данным плотности распределения вероятности температур, не превышает $3,8^\circ\text{C}$ (рис. 5.4, а, в), и коэффициент контрастности термографических изображений не превышает следующих значений [46]:

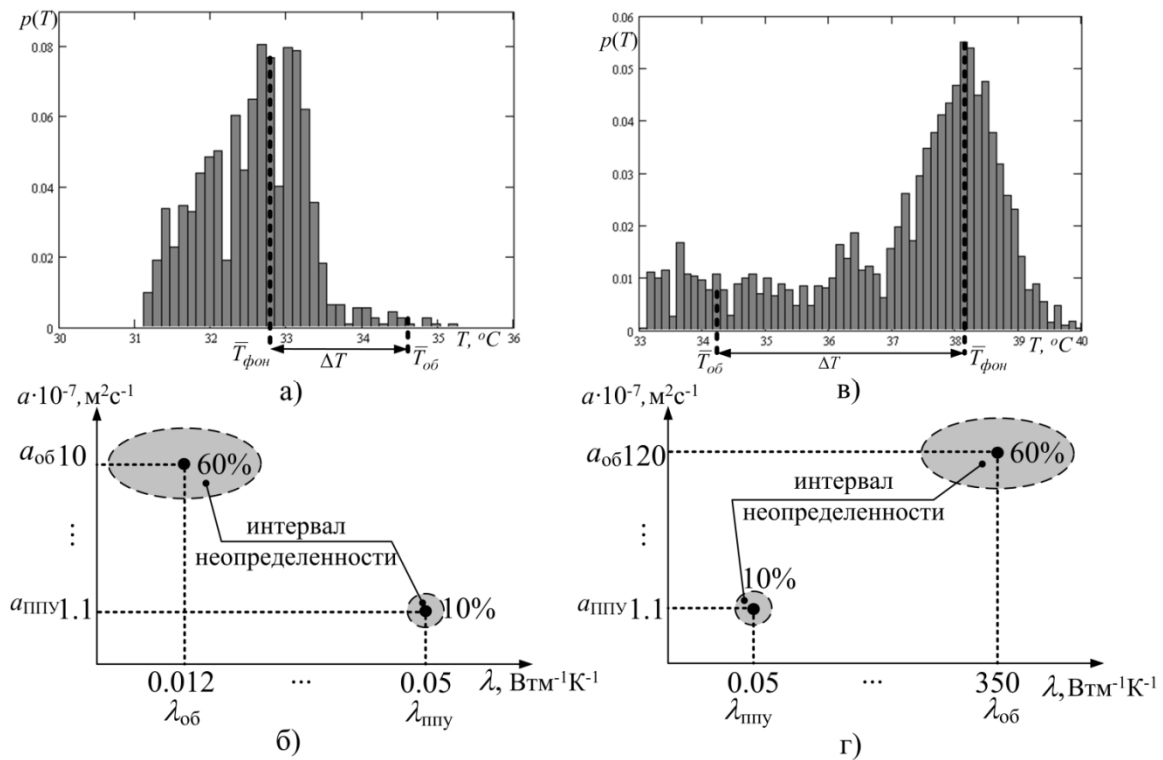


Рис. 5.4. Результаты обработки данных эксперимента по идентификации ТС СПО (п. 4.2)

$$\mathfrak{K} = \frac{\max(\bar{T}_{фон}, \bar{T}_{об}) - \min(\bar{T}_{фон}, \bar{T}_{об})}{\max(\bar{T}_{фон}, \bar{T}_{об}) + \min(\bar{T}_{фон}, \bar{T}_{об})} \approx 0,027 \dots 0,055.$$

Результаты идентификации ТС ППУ: $a_{ППУ} = 1,1 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, $\lambda_{ППУ} = 0,05 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$; воздушных пустот в точке 1 (рис. 4.4, а): $a_{об} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, $\lambda_{об} = 0,012 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ и скрытого металлического объекта в точке 1 (рис. 4.4, б): $a_{об} = 120 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, $\lambda_{об} = 350 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, приведены на рис. 5.4, б, з, а плотности распределения вероятности значений измеренных температур на рис. 5.4, а, в. Коэффициент контрастности изображений по ТС составил [46]:

- для воздушных пустот на основе теплопроводности 0,613, температуропроводности 0,802;
- металлического скрытого объекта на основе теплопроводности 0,999, температуропроводности 0,982.

Идентифицируя ТС и глубину залегания объекта для каждой точки пикселя теплового изображения, можно произвести его реконструкцию и соответственно решить задачу распознавания. Так, в модельной задаче ТС скрытого металлического объекта объемом 8 мм^3 идентифицированы на глубине 4 мм, а пустот – на глубине 2 мм. По тепловым свойствам скрытый объект на рис. 5.4, з можно отнести к металлу, объект на рис. 5.4, б – к теплоизолятору, при этом погрешность идентификации теплопроводности ППУ не превышает 10 %, скрытого объекта до 60 %.

5.2. МОДЕЛЬ ПОИСКА СКРЫТЫХ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ОБЪЕКТОВ В ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ ВОЛН

В настоящее время поиск СПО в ИК-диапазоне волн может производиться как с воздушного носителя в пассивном режиме, так и с подвижного транспортного средства, работающего в пассивном или активном режимах функционирования.

ния ОЭС, включающих в свой состав ТПВП. Основной принцип действия таких ОЭС заключается в кадровом или строчном обзоре поверхности грунта.

Физическая сущность и математическое описание процессов решения задач по идентификации ТС и глубины залегания СПО и их геометрических размеров отражается моделью поиска СПО в ИК-диапазоне волн (рис. 5.5).

Модель представляет собой последовательность звеньев двух видов. Первому из них соответствуют объекты, операции и математические модели (на рис. 5.5 обозначены прямоугольниками), с помощью которых производятся определенные операции обработки и преобразования по отношению к звеньям второго типа – информационным массивам (пространствам изображений).

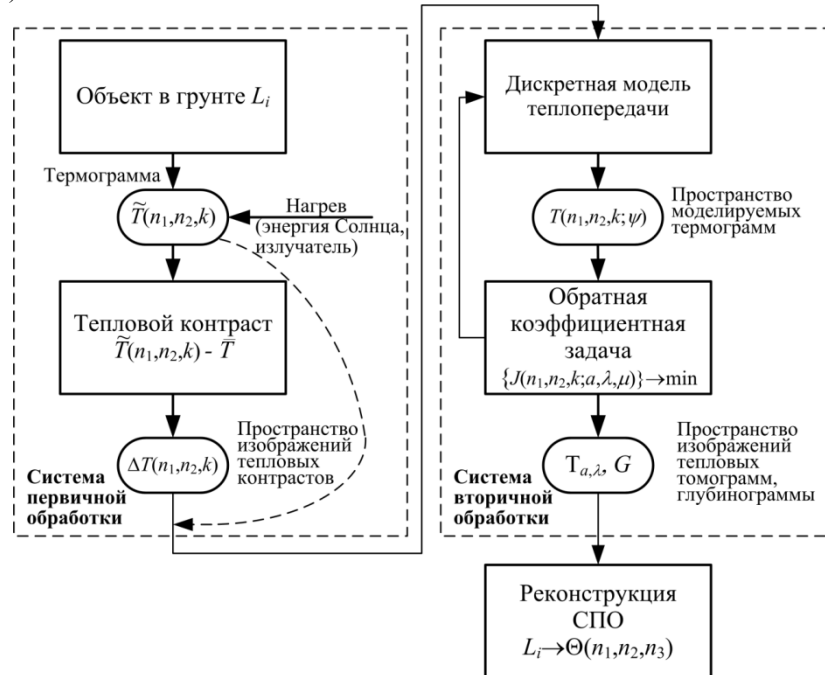


Рис. 5.5. Модель поиска скрытого подповерхностного объекта в ИК-диапазоне волн

Первым звеном в модели является объект. Это звено включает совокупность всех возможных классов СПО с учетом их ТС, размеров и глубины залегания в грунте. Множество СПО L_i считается ограниченным, каждый объект его характеризуется физическими свойствами (тепловыми, геометрическими) и местом расположения под поверхностью грунта. В качестве объектов могут выступать как искусственные сооружения, конструкции и инженерные объекты, так и естественные элементы местности.

Особый смысл имеет нулевой объект L_0 – фон местности. Нулевой объект означает, что на наблюдаемом участке земной поверхности (фоне) отсутствуют какие-либо интересующие наблюдателя подповерхностные объекты искусственного или естественного происхождения. Типовым вариантом фона местности будем считать сухой грунт весной (земля без растительности) или грунтовая (асфальтированная) дорога.

Множеству объектов соответствует пространство термограмм $\tilde{T}(n_1, n_2, k)$ – радиационное излучение грунта в ИК-диапазоне волн, характеризуемое значением температуры в каждой точке разрешения (n_1, n_2) на поверхности грунта. Необходимо отметить, что пространство изображений $\tilde{T}(n_1, n_2, k)$ в каждый момент времени отражает в себе информацию о наличии СПО лишь при динамическом тепловом воздействии на поверхность грунта: излучением (нагрев грунта искусственным излучением или энергией Солнца, охлаждение излучением) или конвективным теплообменом (нагрев или охлаждение при тепловом взаимодействии с окружающей средой).

Сигнал фона \bar{T} формируется в процессе прохождения ИК-волн через среду, которая влияет на сигнал следующим образом:

- отраженное фоном излучение атмосферы, а в общем случае – окружающей среды изменяет радиационное значение температуры фона;
- атмосфера ослабляет (уменьшает) значение радиационной температуры фона до значения, определяемого ее коэффициентом пропускания;
- турбулентность и аэрозольное рассеяние атмосферы размывает контуры изображения.

Наиболее важным обобщенным параметром атмосферы является ее коэффициент пропускания на трассе, расчету которого посвящено множество работ [5, 80 – 82], а их обзор дан в [83].

В общем случае сигнал фона характеризуется двумя показателями: средним значением температуры фона \bar{T} (радиационной температуры) и максимальным разбросом радиационных температур фона ΔT_{ϕ} . Анализ экспериментальных данных по статистике тепловых флуктуаций естественных наземных фонов, а также обобщенных зависимостей величины флуктуаций от времени года и суток представлен в ряде работ [84 – 86]. Для мелкомасштабных температурных неоднородностей фона флуктуации радиационной температуры фона подчиняются закону, близкому к нормальному, а их максимальное значение зависит от типа фона и погодных условий и может быть принято равным [87 – 89]:

$$\Delta T_{\phi} = \begin{cases} 3 \text{ К (лето, день, ясно);} \\ 1 \text{ К (лето, день, облачно);} \\ 2 \text{ К (зима, день, ясно);} \\ 0,5 \text{ К (зима, день, облачно).} \end{cases}$$

В ночных условиях значение ΔT_{ϕ} в среднем в два раза меньше, чем днем в облачную погоду.

В процессе приема сигнала ОЭС перемещается в пространстве, формируя траекторный сигнал методом строчного сканирования. При обеспечении съемки ОЭС неподвижных изображений грунта (применяя беспилотный вертолет) сигнал фона местности формируется методом кадрового сканирования, причем одного и того же участка местности на заданном интервале времени.

Полезный сигнал (аномальный сигнал фона) $\overline{Ta_i}$ формируется аналогично сигналу фона, отражая в себе информацию о нахождении в структуре грунта СПО.

Изображение теплового контраста формируется на основании выражения $\Delta T(n_1, n_2, k) = \tilde{T}(n_1, n_2, k) - \bar{T}$. При этом значения радиационного контраста и теплового контраста связаны выражением: $\Delta T_R = \varepsilon \Delta T$, где ε – коэффициент излучения. Значение контраста, отличного от нуля в точках аномальных сигналов, характеризуется тем, что $\overline{Ta_i} < \bar{T}$, если ТС L_i выше ТС грунта (например, СПО выполнен из металла), и $\overline{Ta_i} > \bar{T}$, если ТС L_i ниже ТС грунта (СПО выполнен из пластмассы и т.п.). Первичная обработка заканчивается получением изображений тепловых контрастов $\Delta T(n_1, n_2, k)$, на основании которых существующими методами [1, 2, 5 – 8, 11 – 13, 17 – 22] и производится принятие решения о наличии СПО относительно к его физическим свойствам и тем более местоположению в грунте. При этом непосредственное принятие решения о наличии СПО осуществляется человеком-оператором.

Следующим за пространством изображений тепловых контрастов звеном модели является система вторичной обработки. Она предназначена для формирования из входных сигналов избыточных термограмм информации об идентифицированных СПО: их тепловых свойствах, глубины залегания, вида материала (теплопроводник – металл, теплоизолятор – пластмасса) и геометрических размерах. Математический аппарат вторичной обработки включает детерминированную численную модель прямой задачи теплопроводности и алгоритм численного решения обратной коэффициентной задачи. Численная модель заканчивается пространством моделируемых термограмм, на основании которых путем вычисления невязки между вычисляемыми термограммами и измеряемыми в ходе первичной обработки, при минимально возможных значениях J , идентифицируют ТС грунта и замаскированные в нем СПО.

Задача идентификации СПО в ИК-диапазоне волн решается как обратная задача идентификации параметров параболического уравнения. Коэффициентные обратные задачи для параболических уравнений типичны для задач тепло- и массопереноса, а также тепловой томографии. Обратные задачи идентификации коэффициентов для линейных уравнений являются нелинейными. Это обстоятельство существенно осложняет проблемы построения вычислительных алгоритмов для приближенного решения коэффициентных задач, делает практически невозможным полное и строгое обоснование их сходимости. Поэтому необходимо следить за адекватностью численных методов полнотой экспериментальных данных [14].

Модель заканчивается пространством изображений тепловых томограмм T_a (по температуропроводности) и T_{λ} (по теплопроводности), в которых каждая изолированная точка отображает значение ТС элемента СПО, и глубинограммы G (в которой каждая изолированная точка отображает значение глубины залегания элемента СПО в грунте).

Заключительным звеном модели является реконструкция – описание состояния трехмерной системы «грунт – СПО», отражающее местоположение и ТС объектов функцией $\Theta(n_1, n_2, n_3)$, выражениями (1.30, 1.31), являющимися отображением реальных СПО L_i .

5.3. МЕТОДИКА ПОИСКА СКРЫТЫХ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ОБЪЕКТОВ В ГРУНТЕ В ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ ВОЛН

На основании модели поиска СПО в ИК-диапазоне волн и метода идентификации ТС СПО обобщенный алгоритм методики представлен на рис. 5.6.

В ходе обзора поверхности грунта в ИК-диапазоне волн (блок 1, рис. 5.6) формируются термограммы как пространственно-временные отображения изменения температуры на поверхности грунта $\tilde{T}(n_1, n_2, k)$.

Блоки 2 – 4 алгоритма выполняются в случае настройки ОЭС, в частности при первом использовании или при ее применении на местности, ТС грунта которой не известны. Важным блоком при настройке системы является блок выделения температурных аномалий на радиационном фоне грунта. По данным работ [81 – 86, 90] известно, что на ΔT_R существенное влияние оказывает скорость ветра. Так, при возрастании от $0,5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ до $5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ величина радиационного контраста повышается с $-4,5$ до $-1,5 \text{ К}$, при этом внутрисуточные колебания ΔT_R не превышают $0,5 \text{ К}$.

Тем не менее установлено, что максимальное значение $|\Delta T_R|$ имеет место в период с 18 до 8 часов [90]. В это время практически отсутствуют и фоновые температурные неоднородности, обусловленные в основном солнечным нагревом грунта и мешающие наблюдению.

Сущность настройки заключается в выделении температурных аномалий на радиационном фоне грунта, получаемых на основании заранее известной физической модели. Для этого в грунт на заданную глубину устанавливаются объекты, ТС которых известны. Производят измерение термограмм во времени и пространстве, рассчитывают $\bar{T}(k)$ и $\overline{Ta}(k)$, после чего идентифицируют параметры ДМ, в частности дискретной модели, описанной в п. 4.3.

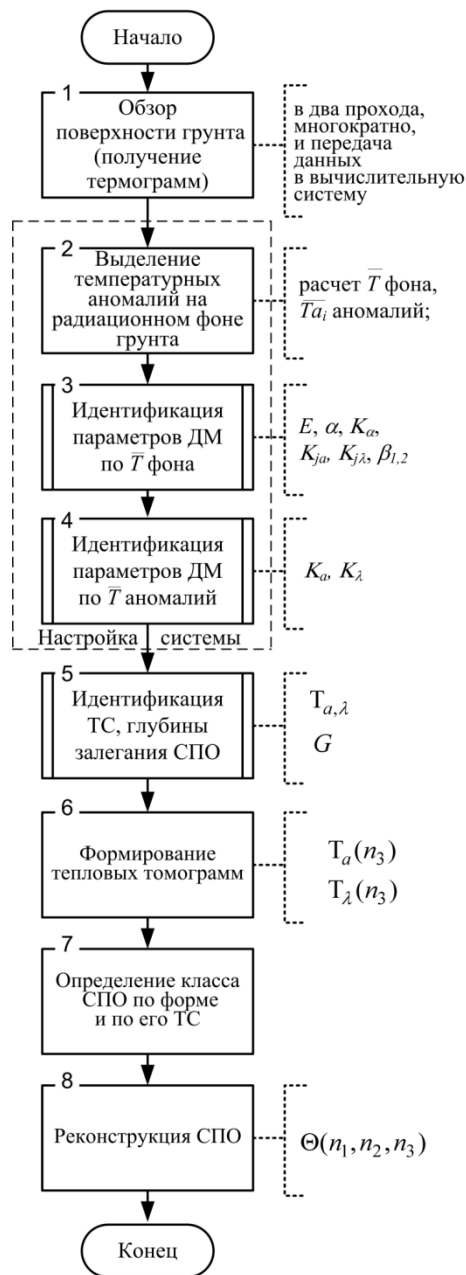


Рис. 5.6. Алгоритм поиска скрытого подповерхностного объекта в грунте

Блок 5. Идентификация ТС и глубины залегания СПО осуществляется согласно алгоритму, приведенному на рис. 5.3.

Блок 6. Формирование тепловых томограмм (3D-изображений по ТС) согласно (1.30) и (1.31) на основании идентифицированных значений ТС и глубины залегания СПО.

Блок 7. Определение класса СПО на основе вычисления неравенства (1.36).

После настройки математического и реализующего его программного обеспечения системы осуществляется последовательное выполнение операций преобразования данных согласно блокам 1 – 8 без выполнения действий в блоках 2 – 4. Результатом работы алгоритма идентификации ТС и глубины залегания СПО (рис. 5.3, блок 5) являются изображения тепловых томограмм и глубинограмма.

Тепловая томограмма является отображением численных значений ТС в пределах прогретого по глубине слоя грунта $n_3 \Delta x$, полученную путем обработки $\tilde{T}(n_1, n_2, k)$ во всем интервале времени измерений.

Рассмотрим сущность определения класса СПО по форме и по его ТС. В качестве признака для классификации подповерхностного объекта выступают идентифицированные ТС и глубина залегания объекта.

Каждый элемент множества G может принимать следующие значения:

0, так как при решении обратной задачи теплопроводности идентифицированы ТС на основании дискретной модели без учета инородного объекта, и для нее невязка (5.1) минимальна;

$2, \mu_2 - 2$, так как при решении обратной задачи теплопроводности идентифицированы ТС на основании математической модели с учетом инородного объекта, при этом минимальна невязка (5.2).

Совокупность одинаковых значений будет характеризовать образ классифицируемой цели, который можно выделить путем вычисления меры различия (1.29). Необходимо отметить, что решение об обнаружении с записью в множество G значения глубины залегания элемента цели производится не на основе порогового критерия, а путем регуляризующего алгоритма обратной задачи теплопроводности.

Использование множеств T_a и T_λ позволяет классифицировать тип объекта как теплопроводник (металл), теплоизолятор (пластмасса) или грунт (песок, глина, земля, щебень, асфальт, бетон). Определяющим параметром в этом случае является теплопроводность (рис. 5.8).

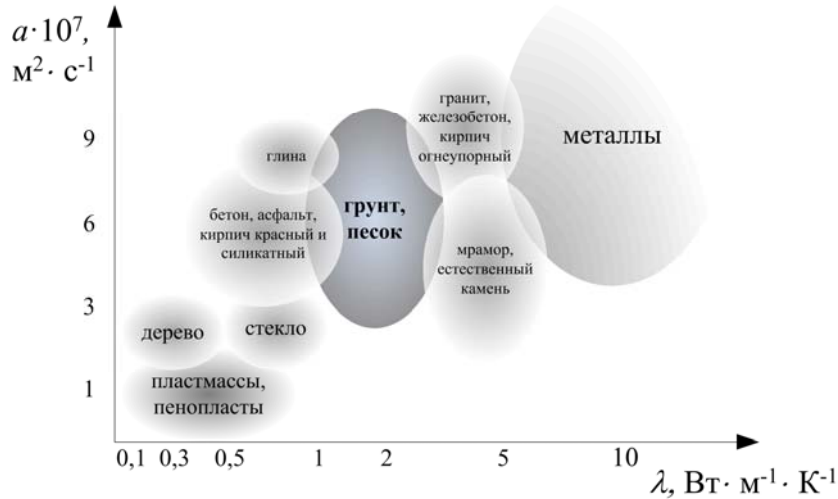


Рис. 5.8. Классификация СПО по ТС материалов

Последним этапом работы алгоритма являются реконструкция СПО путем пространственной обработки множеств T_a , T_λ и G и формирование изображения трехмерной проекции обнаруженных элементов СПО $\Theta(n_1, n_1, n_1)$, выражения (1.30), (1.31). В проекции отображается местоположение L_i в виде точки, ориентированной в пространстве относительно поверхности грунта, а цветом – его классификация относительно ТС.

6. ПРИБОРЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СКРЫТЫХ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ОБЪЕКТОВ

Коренные изменения технологии научных исследований, вызванные широким использованием компьютеров, хорошо известны. Математическое и компьютерное моделирование физических процессов и явлений – один из основных элементов новой технологии научных исследований [58, 91].

Компьютеризация полностью изменила облик измерительных приборов, наделив их широкими возможностями автоматизации и математической обработки измерений, памятью и гибкими системами отображения результатов интерпретации измерений [92].

Для того чтобы ответить на вопросы, как, собственно, следует измерять и какими характеристиками должен обладать измерительный прибор, чтобы после компьютерной обработки измерения можно было получить наиболее точную его интерпретацию, необходимо рассматривать ОЭС идентификации СПО как единый измерительный прибор. При этом измерительный прибор и среда, в которой находится объект, взаимодействуют и оказываются в той или иной степени возмущенными, а в процессе идентификации определяются параметры объекта, свойственные невозмущенной системе «исследуемый объект-среда». Подчеркнем, что речь идет о таких характеристиках, которые не могут быть измерены непосредственно и должны быть вычислены на основе воздействия объекта и среды на измерительную компоненту ОЭС, и должны быть вычислены характеристики не измеряемого объекта, искаженные при измерении, а исследуемого, свойственные его естественному состоянию.

6.1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Математическое и программное обеспечение и основанные на них вычислительные системы служат основой для получения новых знаний. Следовательно, предложенные физические и математические модели должны реализовываться в программах для ЭВМ, так как только вычислительный эксперимент позволяет достаточно полно изучить свойства моделей и сравнить предсказанное ими поведение изучаемого объекта с натурным экспериментом [92].

По существу вопрос состоит в том, чтобы создать, используя формализованное описание и средства вычислительной техники, программно-машинный комплекс для воспроизводства на ЭВМ реальной картины изучаемого физического явления. Такой программно-машинный комплекс, обеспечивающий вычислительный эксперимент, состоит из технических устройств, системного и прикладного математического (программного) обеспечения и средств взаимодействия. Системное математическое обеспечение служит для организации технического функционирования ЭВМ, содержит комплекс управляющих и обрабатывающих программ, инструкций и описаний и является обязательной принадлежностью вычислительной машины. Примерная классификация программного обеспечения (ПО) ЭВМ представлена на рис. 6.1.

Эффективность использования ЭВМ определяется совершенством программ системного математического обеспечения. Системные программы органически связаны с архитектурой ЭВМ и составляют ее операционную систему.

Прикладное математическое обеспечение представляет собой комплекс программ для решения прикладных научных и других задач. Часть программ поставляется вместе с ЭВМ в виде библиотеки стандартных программ, драйверов, а основная часть разрабатывается пользователем ЭВМ с помощью ПО разработки приложений для конкретной области применения. Прикладное математическое обеспечение оформляется в виде пакета прикладных программ для ЭВМ, построенного по модульному принципу. Модульный принцип заключается в том, что программы пакета формируются как независимые блоки, способные вступать во взаимодействие между собой под управлением организующей программы.

Разработка пакетов прикладных программ представляет сравнительно новое направление в программировании и характеризует новый этап в развитии отношений между человеком и ЭВМ. Процесс развития этих отношений непрерывно совершенствуется. По мере роста «образования» вычислительных машин на них все больше перекладывается мыслительных функций.

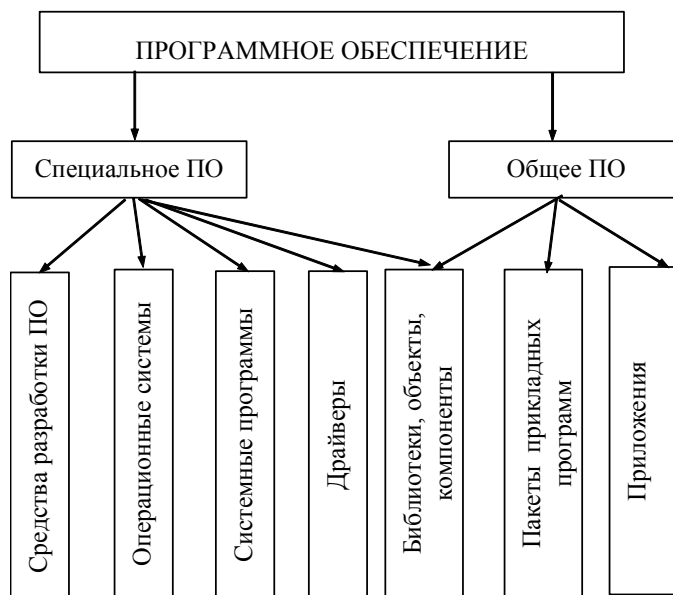


Рис. 6.1. Примерная классификация программного обеспечения

В разработке больших программ реализуются два пути: создание библиотек программ и создание программных комплексов. Библиотека программ, по существу, предназначена для расширения вычислительных возможностей ЭВМ, ее системы команд. Как правило, эти программы хорошо оттестированы, имеют подробное описание, легко доступны. Такая библиотека поставляется совместно с ЭВМ и с ней приходится знакомиться каждому работающему на вычислительной машине. Основным недостатком библиотек – программы пишутся независимо и поэтому несогласованы друг с другом, т.е. отсутствует связь между подпрограммами библиотек, как по управлению, так и по данным.

Программный комплекс в отличие от библиотеки имеет взаимосвязанную жесткую структуру. В нем нет свободы вызовов подпрограмм и передачи данных. Пользователю доступны только некоторые управляющие параметры для выбора модели из того класса, который зашит в комплекс, и описание необходимых начальных данных.

Следует обратить внимание на то, что дальнейший прогресс в программировании связан с разработкой пакетов прикладных программ, сочетающих достоинства библиотек и комплексов программ.

Таким образом, практической разработкой пакета прикладных программ для проведения вычислительного эксперимента на ЭВМ выливается в построение крупной программной системы с множеством подпрограмм и со сложным их взаимодействием. На сегодняшний день, по-видимому, единственно реальный путь обеспечения многомодельности и многовариантности вычислительного эксперимента программными средствами – это использование модульного принципа программирования в сочетании с развитыми системными средствами ЭВМ.

6.2. ПРОГРАММНОЕ И АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СРЕДСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В основу разработки ПО для средства технического диагностирования (СТД) теплоизоляционных материалов заложен модульный принцип программирования в сочетании с развитыми системными средствами (рис. 6.2).

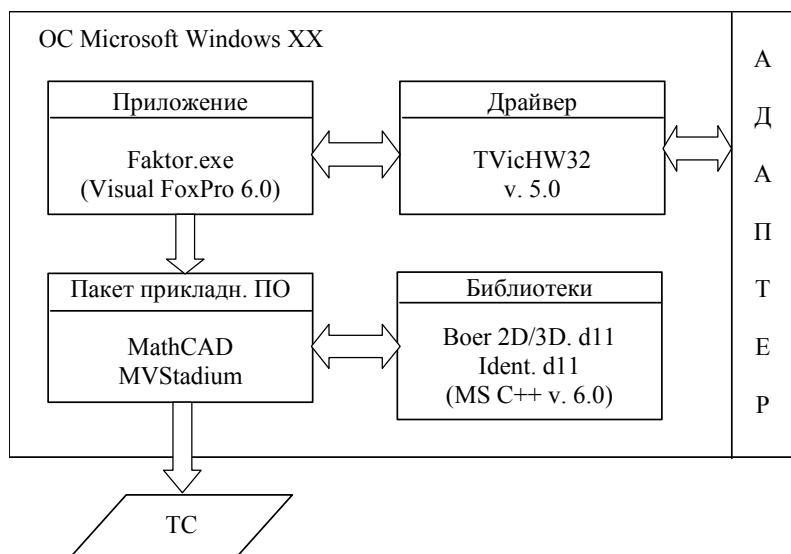


Рис. 6.2. Структура ПО СТД

Так, задача обмена данными с адаптером на уровне системной магистрали ЭВМ под управлением операционной системы возложена на драйвер TVicHW32 5.0.

Ядром ПО является программа-приложение Faktor.exe, реализованная на языке Visual FoxPro 6.0, пошагово выполняющая следующие действия (прил. Ж) [93].

Шаг 1. Настройка СТД, задание параметров измерений (рис. Ж.1).

Шаг 2. Режим термостатирования (рис. Ж.2).

Шаг 3. Режим измерений (рис. Ж.3).

Непосредственно задача идентификации ТС испытуемого образца решается в среде математической обработки данных MathCAD (шаг 4, рис. Ж.4).

На рис. 6.3 приведена функциональная схема СТД. В состав функциональной схемы аппаратных средств диагностирующей системы на базе ПК входят зонд и адаптер (прил. Ж).

Зонд содержит усилитель сигнала У от термопреобразователя, делитель напряжения ДН с подключенным к нему термочувствительным элементом, ключ К для электрического подключения нагревательного элемента.

Адаптер вставляется в ISA (Industrial Standard Architecture) слот ПК. В состав адаптера входят: мультиплексор М, десятиразрядный аналогово-цифровой преобразователь АЦП, регистры данных Р1 и Р2, линии задержки, реализованные на одновибраторах, оптронный ключ ОК и блок управления БУ.

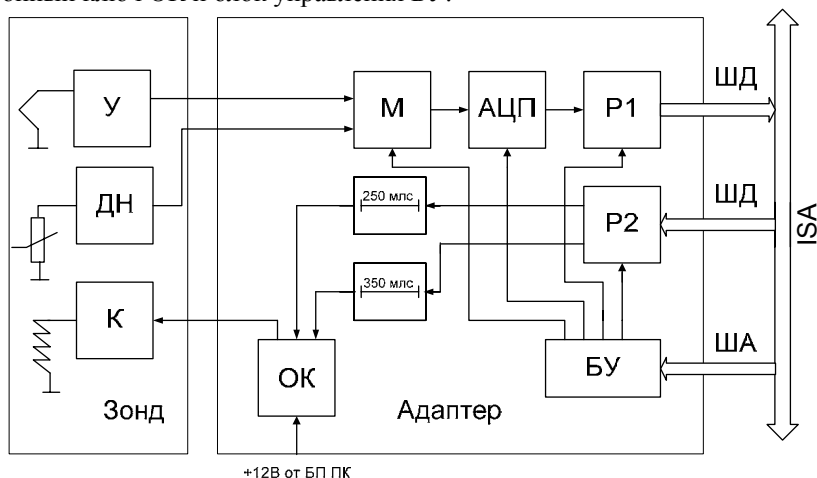


Рис. 6.3. Функциональная схема средства технического диагностирования

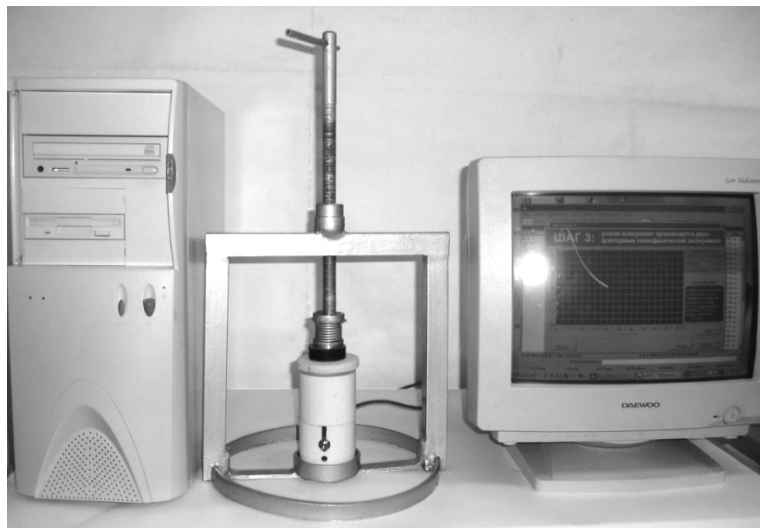


Рис. 6.4. Внешний вид СТД «Фактор-5»

На основе разработанного программного обеспечения и аппаратных средств было создано СТД «Фактор-5» (рис. 6.4).

В режиме подачи теплового импульса устройство работает следующим образом. По шине адреса ША подается код порта 0x31E для записи в P2 данных кода длительности теплового импульса.

Для подачи импульса длительностью 250 мс на шину данных поступает код 191, а для импульса длительностью 350 мс – код 239. В зависимости от кода регистр формирует управляющий импульс на один из двух одновибраторов, генерирующих электрические импульсы заданной длительности. С выхода одновибраторов сигнал поступает на оптронный ключ, который обеспечивает подачу напряжения от блока питания БП персонального компьютера на нагревательный элемент. Использование двух одновибраторов позволяет подавать напряжение питания на нагревательный элемент в течение 250 или 350 мс, что обеспечивает различное выделение тепла.

В режиме измерения аналоговые сигналы от операционного усилителя и делителя напряжения поступают на мультиплексор. По шине адреса подается код порта для считывания данных измерения термодпары (порт 0x31C) или данных терморезистора (порт 0x131C). Мультиплексор, подключая термопреобразователи, обеспечивает поступление измеряемого напряжения на АЦП. В результате преобразования аналогового сигнала в цифровой двоичный код записывается в регистр P1, после чего поступает на шину данных ШД.

Результаты практической реализации метода, изложенного в п. 3.1 с использованием созданного СТД «Фактор-5» приведены в работе [48].

6.3. СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ УСТРОЙСТВА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Для повышения вычислительной производительности СТД возможно применение устройств предпроцессорной обработки информации, в частности для измерения избыточных температур и скорости изменения температуры [94 – 96].

Для измерения избыточных температур предложено устройство измерения разности температур с использованием управляемого терморезистора [94]. Структурная схема устройства приведена на рис. 6.5.

При равенстве температур контролируемых объектов $T_1 = T_2$ сопротивления терморезисторов 1 и 2 имеют значения, при которых мост М сбалансирован, при этом на входах усилителя У разность потенциалов равна нулю, при $T_1 > T_2$ мост разбалансирован. Напряжение разбаланса моста поступает на вход У, при этом пиковый детектор Д преобразует усиленное импульсное напряжение в постоянное, равное амплитуде импульса, которое запоминается конденсатором С и поддерживается на затворе управляемого терморезистора 2. Генератор импульсов ГИ питает диагональ питания моста М и через блок задержки БЗ управляет работой детектора. Напряжение на выходе устройства $U_{\text{вых}}$ зависит от величины разности температур T_1 и T_2 .

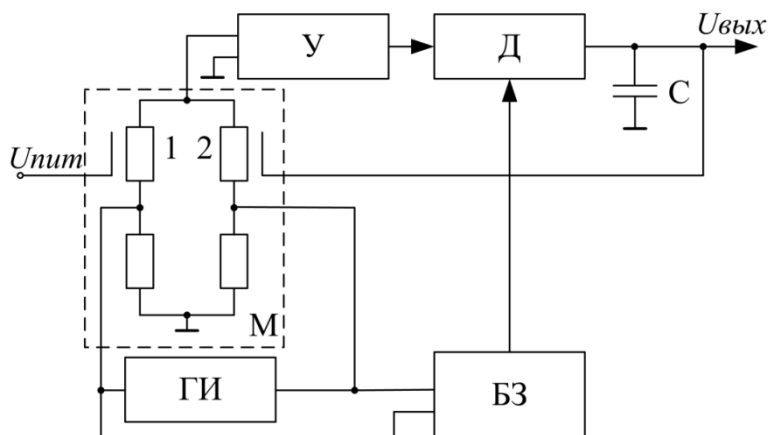


Рис. 6.5. Устройство для измерения разности температур

Предложенный преобразователь представляет собой следующую систему автоматического управления. Импульсы ГИ имеют малую длительность и большую амплитуду, которая рассчитывается на основании допустимой мощности рассеивания терморезисторов 1 и 2, что позволяет существенно повысить точность измерения малых разностей температур.

В случае использования терморезисторов, включенных в мостовую схему, возможно применение устройства для измерения разности температур (рис. 6.6) [95].

Устройство работает следующим образом. Терморезисторы R_1 и R_2 находятся в разных контролируемых точках исследуемого объекта, для которых осуществляется измерение разности температур, а резистор 5 размещается в одной из двух контролируемых точек исследуемого объекта и может быть выполнен в едином корпусе с одним из терморезисторов.

Разность температур терморезисторов определяет напряжение в измерительной диагонали моста, которое усиливается усилителем У и через делитель напряжения ДН подается на вход селектируемого пикового детектора Д. Резистор 5 предназначен для автоматической компенсации нелинейности характеристик терморезисторов, изменяя в зависимости от температуры коэффициент передачи делителя ДН.

Степень компенсации зависит от соотношения сопротивлений резистора 5 и резисторов 6 и 7, которые рассчитываются для заданного диапазона изменения температуры с учетом конкретного типа терморезисторов. Резистор 8 дополнительно шунтирует выход У и используется только для усилителей с токовым выходом.

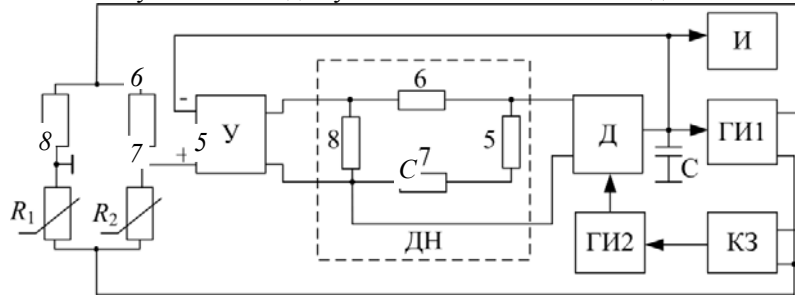


Рис. 6.6. Устройство для измерения разности температур

Выходное напряжение с делителя ДН, снимаемое с резисторов 7 и 5, используется при работе с терморезисторами, сопротивление которых увеличивается с ростом температуры по квадратичной зависимости с отрицательным нелинейным членом (платиновые терморезисторы). При использовании терморезисторов с положительным нелинейным членом температурной характеристики (например, никелевые терморезисторы) выходной сигнал с делителя ДН снимается с резисторов 6 или 7.

Детектор Д преобразует усиленное импульсное напряжение разбаланса моста, равное амплитуде импульса, которое запоминается емкостью C и управляет частотой генератора ГИ1. Частота следования импульсов данного генератора пропорциональна напряжению на емкости C . Выходные импульсы ГИ1 питают диагональ питания моста и, одновременно, управляют работой Д через каскад задержки КЗ и генератор строб-импульса ГИ2. Напряжение с емкости C подается также на вычитающий вход дифференциального усилителя У, обеспечивая отрицательную обратную связь по напряжению, и измеряется индикаторным прибором И. Введение отрицательной обратной связи в устройство обеспечивает высокую точность преобразования напряжения разбаланса моста. Импульсы ГИ1 имеют малую длительность и большую амплитуду, которая рассчитывается на основании допустимой мощности рассеивания терморезисторов R_1 и R_2 .

В случае необходимости измерения скорости изменения температуры возможно применение устройства, представленного на рис. 6.7 [96].

При работе устройства на входы дифференциального усилителя ДУ подается через усилитель постоянного тока УПТ сигнал термопреобразователя ТП. Используемые конденсаторы C_1 и C_2 оперативно запоминают информацию. Нулевое напряжение на выходе дифференциального усилителя ДУ соответствует равенству напряжений на запоминающих конденсаторах и, соответственно, нулевой скорости изменения температуры. Появление напряжения $\Delta U_{\text{вых}}$ на выходе ДУ свидетельствует о разности напряжений на запоминающих конденсаторах, а также о знаке этой разности $\text{sign } \Delta T$. Разностное напряжение преобразуется блоком выделения модуля БВМ в напряжение $|\Delta U_{\text{вых}}|$ и сравнивается с опорным напряжением U_0 схемой сравнения СС. Если $|\Delta U_{\text{вых}}| > U_0$, то СС формирует на своем выходе короткий импульс $F_{\text{вых}}$ и замыкает ключ К. Конденсатор C_2 заряжается до выходного напряжения УПТ, а на входе ДУ устанавливаются равные напряжения.

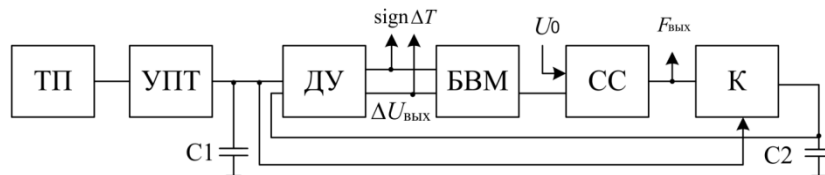


Рис. 6.7. Устройство для измерения скорости изменения температуры

Таким образом, на выходе устройства формируется поток импульсов с частотой $F_{\text{вых}}$, прямо пропорциональной скорости изменения температуры ТП, при этом величина напряжения U_0 выбирается из соображений помехоустойчивости устройства и шага дискретизации.

При технической реализации граничных функций в процессе проведения теплофизического эксперимента возникает необходимость в формировании для электрических регуляторов задающих электрических сигналов. Поэтому вопросы построения таких преобразователей требуют специального рассмотрения.

Ряд способов определения теплофизических характеристик материалов основан на регулярном тепловом режиме исследуемых материалов. В связи с тем, что скорость изменения логарифма избыточной температуры тела по времени при регулярном режиме первого рода (темп нагрева) прямо пропорциональна коэффициенту теплопроводности тела, существенный интерес представляют логарифмирующие устройства. Следует также отметить, что для усиления электрических сигналов, изменяющихся в широком диапазоне, успешно применяются логарифмирующие усилители.

Предложенное устройство показано на рис. 6.8.

Напряжение $U_x(\tau)$ из узловой точки нестационарной модели поля НМП1 подается на второй вход блока сравнения БС, на первый вход которой поступает напряжение $U_3(\tau)$ с модели НМП2. При скачкообразном изменении сигнала на выходе блока задания температур БЗТ и заранее заданных параметрах модели поля НМП2 напряжение $U_3(\tau)$ является кривой разгона.

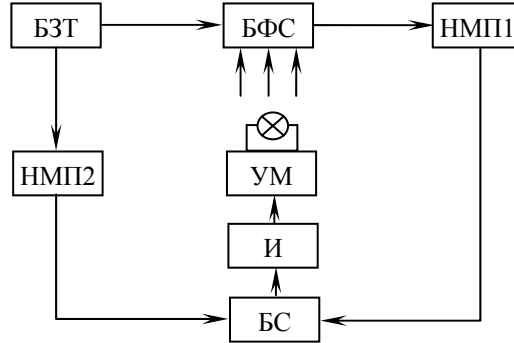


Рис. 6.8. Устройство для моделирования процесса теплопроводности

С выхода блока сравнения БС $U_3(\tau) - U_x(\tau)$ через интегратор И и усилитель мощности УМ поступает на источник света ИС, который оптически связан с блоком формирования внешнего термического сопротивления БФС. С изменением освещенности изменяются ток i , втекающий в модель поля НМП1, и напряжения узловых точек модели. Следящая система автоматического управления обрабатывает такой ток i в блоке БФС, который стремится установить равенство $U_3(\tau) = U_x(\tau)$. Таким образом, задавая заранее кривой разгона, т.е. программируя ее на выходе нестационарной модели НМП2, можно определить коэффициент теплообмена, регистрируя ток i (на чертеже условно не показано) для любой узловой точки модели НМП1 с желаемой температурной кривой. Если в качестве усилителя мощности УМ использовать последовательно соединенные генератор управляемой частоты и стандартизатор импульсов по длительности и амплитуде, то частота следования импульсов на выходе генератора будет прямо пропорциональна мощности, потребляемой источником света ИС.

Для функционального преобразования и воспроизведения обратных функций с масштабируемым аргументом предложена структурная схема преобразователя, представленная на рис. 6.9.

На вход преобразователя поступает входная величина X . На другой вход блока сложения БС поступает величина X_1 с выхода блока вычитания БВ. На выходе преобразователя получается сумма:

$$Y = X + X_1, \tag{6.1}$$

которая одновременно подается на второй вход блока вычитания БВ и на вход блока прямого преобразования БПП. На первый вход блока вычитания БВ подается величина $z = K_y f(Y)$ с выхода усилителя Y (K_y – коэффициент усиления усилителя Y).

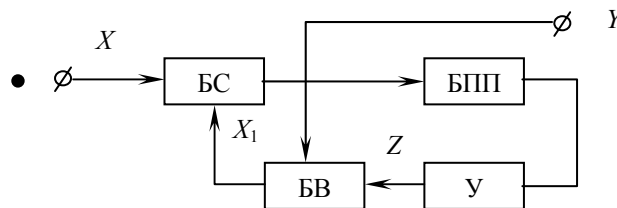


Рис. 6.9. Преобразователь для воспроизведения обратных функций с масштабируемым аргументом

Выходная величина блока вычитания БВ

$$X_1 = Y - Z. \tag{6.2}$$

После подстановки формулы (6.2) в (6.1) получим

$$X = Z = K_y f(Y),$$

$$Y = F(x/K_y) = F(z/K_y).$$

Таким образом, предложенный функциональный преобразователь воспроизводит обратные функции с аргументом, подвергнутому масштабным преобразованиям.

Структурная схема разработанного релейного функционального преобразователя для выделения модуля входного сигнала с повышенной помехозащищенностью приведена на рис. 6.10.

Интегратор И и релейный элемент РЭ1 вместе с первым суммирующим элементом работают в автоколебательном режиме.

При входном напряжении преобразователя $U_{вх} = 0$ на выходе блока логической функции «равнозначность» БЛФ формируются импульсы положительной и отрицательной полярности и равной длительности. Частота следования импульсов определяется постоянной времени интегратора И и величиной порогов переключения релейного элемента РЭ1. При $U_{вх} \neq 0$ длительность импульсов на выходе элемента РЭ1 изменяется за счет подачи на вход интегратора в одну часть периода суммы, а во вторую часть – разности напряжений с выхода элемента РЭ1 и $U_{вх}$. Среднее напряжение на выходе фильтра ФНЧ устанавливается равным

$$U_{ввых} = kU_{вх}; \quad k > 1; \quad k = \text{const}.$$

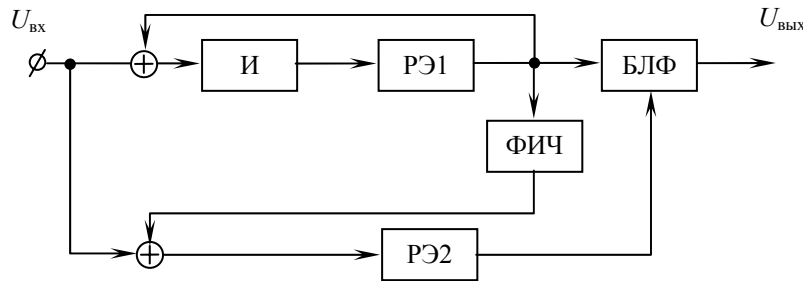


Рис. 6.10. Релейный функциональный преобразователь

Если $U_{вх} = 0$, то на выходе второго релейного элемента РЭ2 устанавливается постоянное напряжение положительной или отрицательной полярности.

При $U_{вх} \neq 0$ на вход релейного элемента РЭ2 подается напряжение

$$U = (k + 1)U_{вх},$$

которое переключает его в одно из двух состояний. В этом случае совпадение знаков выходных напряжений элементов РЭ1 и РЭ2 на входах блока только в одну часть периода автоколебаний формирует на выходе блока БЛФ логическую «1», а во вторую часть периода – логический «0». На выходе преобразователя при $U_{вх} \neq 0$ обеспечивается положительный знак среднего напряжения, который не изменяется при изменении полярности входного напряжения.

Таким образом, среднее значение выходного напряжения устройства пропорционально модулю входного сигнала.

Схема функционального генератора, который может быть применен в качестве программного устройства для задания граничных условий при теплофизических измерениях, показана на рис. 6.11 [97].

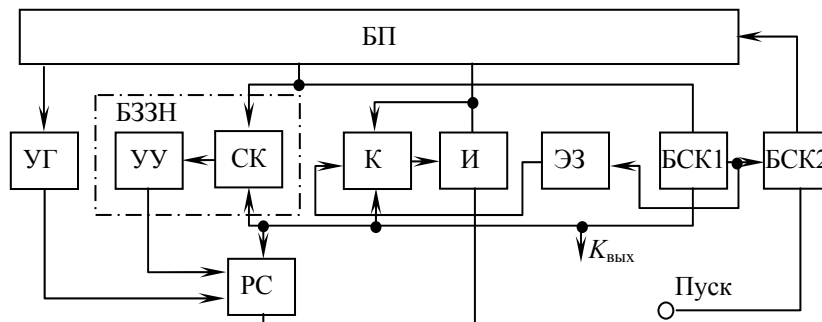


Рис. 6.11. Функциональный генератор

При пуске генератора коммутатор К определяет на втором выходе блока памяти БП код (например, двоичный параллельный) конечной ординаты текущего отрезка, который поступает на второй вход блока задания знака наклона БЗЗН и на первый вход блока БСК1. На первом выходе блока памяти БП определяется код скорости изменения функции, поступающий на вход генератора УГ. Выходные импульсы генератора УГ поступают на счетный вход счетчика РС. Выходной код ($K_{ввых}$) счетчика поступает на первый вход блока БЗЗН и на второй вход блока БСК1, а также является выходным сигналом функционального генератора. Направление счета счетчика, т.е. знак наклона текущего отрезка, определяется выходным сигналом узла СК, который при помощи узла УУ задает прямой счет счетчика, если код конечной ординаты отрезка больше текущего кода счетчика, и обратный счет – если код конечной ординаты отрезка меньше кода этого счетчика. Когда код счетчика становится равным коду конечной ординаты отрезка, блок БСК1 выдает сигнал коммутатору К для перехода на следующий отрезок функции. При этом импульс с блока БСК1 через элемент задержки ЭЗ включает блок БСК2. Время задержки импульса элементом задержки ЭЗ определяется временем переключения коммутатора К. Если значения кодов в счетчике и на третьем выходе блока памяти БП равны, то описанный цикл работы повторяется. Это соответствует равенству значений левого и правого пределов аппроксимированной функции. При различных значениях кодов в счетчике и на третьем выходе блока памяти (что соответствует разрыву первого рода функции в узле аппроксимации) на выходе блока БСК2 появляется импульс, который открывает блок элементов И и осуществляет дискретно установку кода в счетчике, равного коду на третьем выходе блока памяти БП. Сигнал на выходе функционального генератора также изменяется дискретно во времени и в строгом соответствии со скачком разрыва аппроксимируемой функции.

Схема генератора аналогового действия приведена на рис. 6.12 [98]. В исходном состоянии ток, втекающий в инвертирующий вход усилителя У, равен нулю. Напряжение на выходе усилителя также равно нулю. В момент времени t под

действием управляющих воздействий изменяет свою величину делитель УДН1 (или УДН2). В цепи, состоящей из делителя УДН1, резисторов $R_1 - R_4$ и делителя УДН2, происходит перераспределение токов, и в инвертирующий вход усилителя $У$ втекает ток положительной или отрицательной полярности, который интегрируется конденсатором $С$. Изменяя соответствующим образом входной ток усилителя $У$, можно на выходе генератора получить кусочно-линейные знакопеременные функции времени. При подаче импульса сброса на управляющий вход ключа $Кл$ последний замыкается и конденсатор $С$ разряжается. На выходе генератора устанавливается напряжение, равное нулю. Причем один из делителей УДН1 можно заменить постоянным резистором, что упростит управление, так как знакопеременное напряжение на входе усилителя $У$ может быть получено путем изменения состояния одного из управляемых делителей.

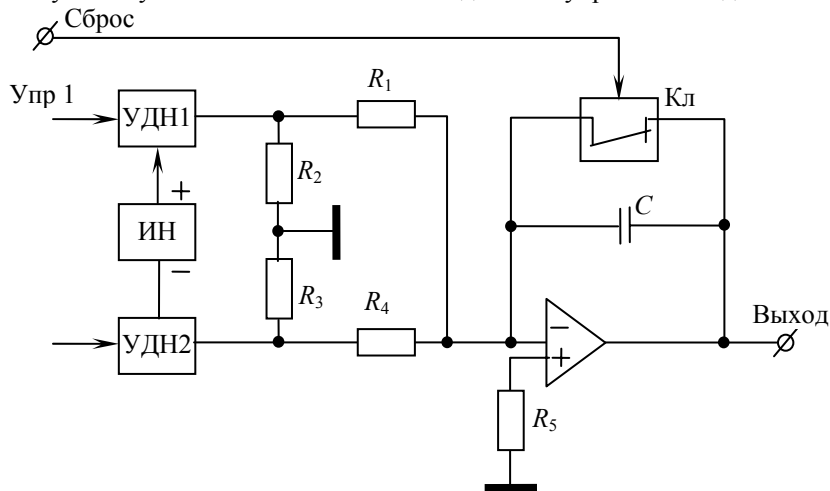


Рис. 6.12. Функциональный генератор

Структурная схема задатчика регулярного теплового режима 1-го рода исследуемых материалов показана на рис. 6.13. Задатчик работает совместно с высокоточным регулятором температуры ВРТ-2. Скорость изменения температуры может устанавливаться дискретно: 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 2 град/мин.

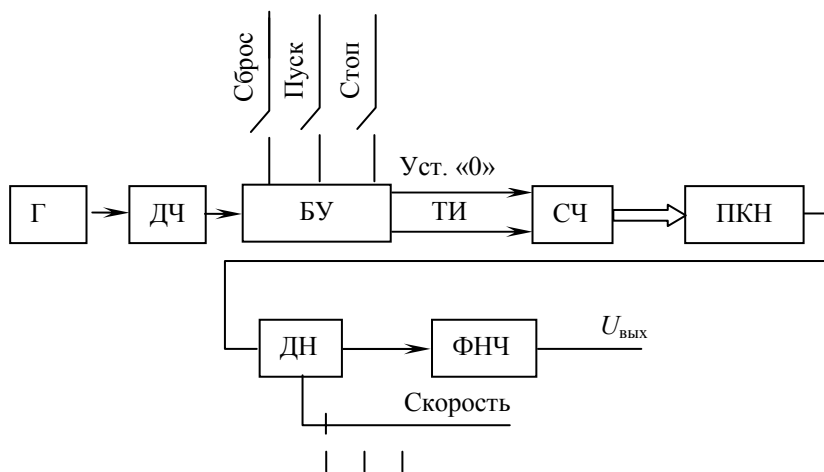


Рис. 6.13. Задатчик регулярного теплового режима

Генератор опорной частоты Γ подключен к делителю частоты ДЧ. Импульсы с выхода ДЧ поступают на вход блока управления БУ. Сигналом «Сброс» на выходе БУ формируется сигнал установки счетчика Сч в нулевое состояние. Сигналы «Пуск» и «Стоп» соответственно разрешают или запрещают поступление тактовых импульсов ТИ на вход счетчика. Счетчик Сч заполняется импульсами с постоянной частотой, формируемые на выходе ДЧ.

Код счетчика подается на вход преобразователя код – напряжение ПКН. Напряжение с выхода ПКН поступает на дискретный делитель напряжения ДН, управляемый переключателем «Скорость». Фильтр частот ФНЧ осуществляет фильтрацию переменных составляющих.

Структурные схемы экспоненциальных преобразователей с аналоговым и частотным выходными сигналами описаны в работах [99, 100]. Функциональная схема косинусного преобразователя с частотно-импульсным выходным сигналом приведена в работе [101].

Логарифмический аналого-цифровой преобразователь [102] показан на рис. 6.14.

На вход запуска преобразователя U_3 поступает импульс, который устанавливает в реверсивном счетчике Сч1 код N_0 заранее заданного числа и одновременно через элемент ИЛИЗ переключает триггер Тг2 в единичное состояние или подтверждает это состояние. При этом на вход «режим работы» счетчика Сч1 с инверсного выхода триггера Тг2 поступает логический «ноль», а на вход «режим работы» счетчика Сч2 – логическая «единица». Состоянию логический «ноль» на входах счетчиков Сч1 и Сч2 соответствует режим вычитания, а состоянию «единица» – режим суммирования импульсов. После прохождения импульса запуска через блок БЗ1 (блок запаздывания) триггер Тг1 переключается в единичное состояние и открывает ключи И1 и И4. Ключи И2 и И3 при этом закрыты логическим «нулем» с инверсного выхода триггера Тг2. На выходах элементов ИЛИ1 и ИЛИ2 начинают формироваться потоки импульсов от генераторов ГОЧ1 и ГОЧ2 с частотами f_{01} и f_{02} , которые поступают на основные входы счетчиков Сч1 и Сч2. Счетчик Сч1 работает в режиме вычита-

ния, а счетчик Сч2 – в режиме суммирования. В счетчик Сч1 записывается число $N_1 = N_0 - f_{01}\tau$, а в счетчик Сч2 – число $N_2 = f_{02}\tau$.

В момент времени τ_1 происходит обнуление счетчика Сч1, а на выходе элемента Иб формируется импульс. При этом переключается триггер Тг2, закрывающий своими выходами ключи И1, И4 и открывающий ключи И2 и И3. Счетчик Сч1 переключается на режим суммирования, а счетчик Сч2 – на режим вычитания. В счетчике Сч2 при этом записывается число $N_2 = f_{02}\tau_1$. В следующий момент времени на вход счетчика Сч1 поступают импульсы с частотой f_{02} через ключ И3 и

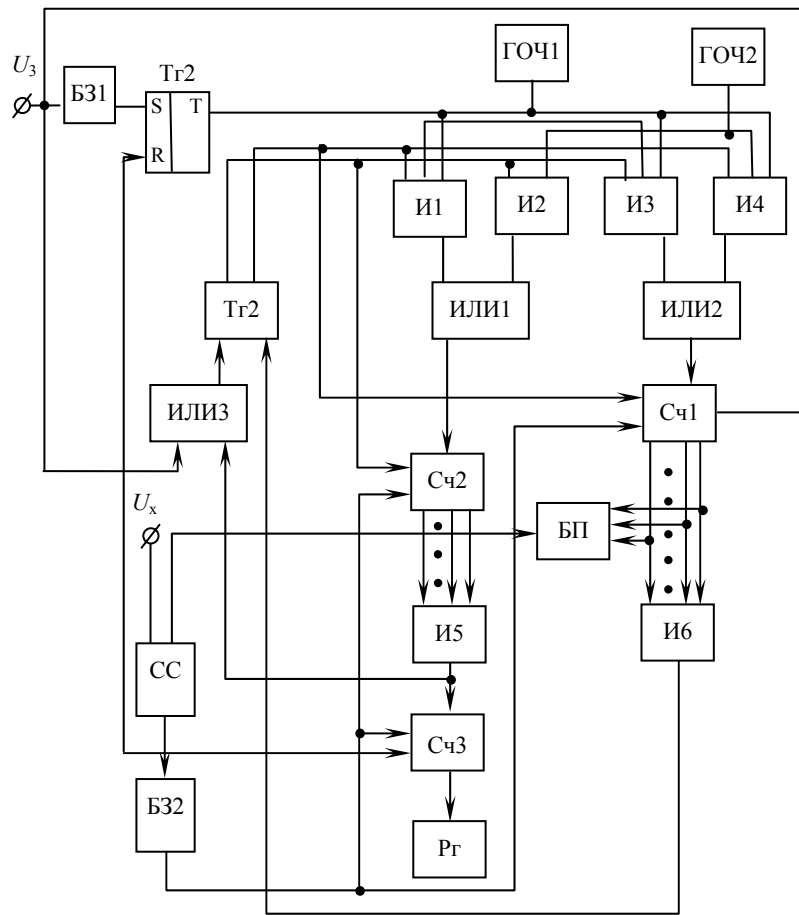


Рис. 6.14. Логарифмический аналого-цифровой преобразователь

элемент ИЛИ2, а на вход счетчика Сч2 – импульсы с частотой f_{12} через ключ И2 и элемент ИЛИ1. Числа, записываемые в счетчиках Сч1 и Сч2, равны

$$N_1 = f_{02}\tau;$$

$$N_2 = f_{02}\tau_1 - f_{01}\tau.$$

После обнуления счетчика Сч2 в момент времени τ_2 в счетчике Сч1 записывается число $N_1 = f_{02}\tau_2$, с учетом

$$\tau_1 = \frac{N_0}{f_{01}}, \quad N_1 = \frac{f_{02}^2}{f_{01}^2} N_0.$$

В суммирующем счетчике Сч3 записывается «единица» с выхода элемента И5 и одновременно через элемент ИЛИ3 осуществляется переключение триггера Тг2. Далее описанный цикл работы преобразователя повторяется до тех пор, пока сигнал с выхода блока БП преобразования «код – аналог» не станет равным U_x на входе схемы сравнения СС. В этом случае на выходе схемы сравнения СС формируется импульс, который осуществляет перенос числа из счетчика Сч3 в регистр Рг, переключение триггера Тг1 в нулевое состояние и через элемент запаздывания БЗ2 устанавливает счетчики Сч1 – Сч3 в нулевые состояния (подтверждая эти состояния и исключая накопление ошибки от случайных помех в процессе работы). При числе K , записанном в счетчике Сч3, в счетчике Сч1 записано число

$$N = \left(\frac{f_{02}^2}{f_{01}^2} \right)^k N_0.$$

Равенство напряжений на входах схемы сравнения СС с выхода блока БП и входного U_x определяет соотношения

$$k = \log_a \frac{N}{N_0},$$

где

$$a = \frac{f_{02}^2}{f_{01}^2},$$

или $k = \log_a \frac{U_x}{U_0}$, где U_x и U_0 – соответственно преобразуемое напряжение и напряжение, принимаемое часто за единицу.

Логарифмический преобразователь с генераторами экспоненциального и линейно изменяющегося напряжения [103] (рис. 6.15) работает следующим образом.

Сигналом с выхода дифференциатора импульсов Д запускаются генераторы экспоненциального и линейно изменяющегося напряжений ГЭН и ГЛИН, выходные напряжения которых равны

$$U_1(\tau) = U_1 \exp\left(-\frac{\tau}{t}\right); \quad (6.3)$$

$$U_2(\tau) = \frac{U_m}{T} \tau, \quad (6.4)$$

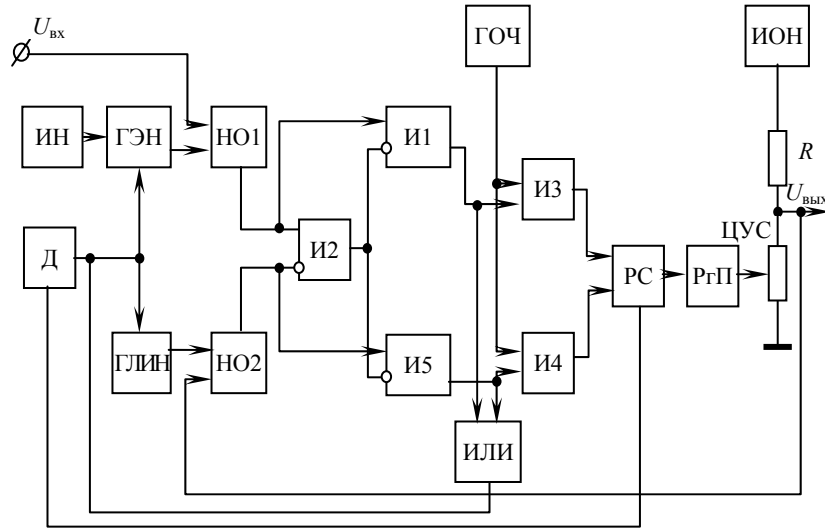


Рис. 6.15. Логарифмический преобразователь

где U_1, U_m – постоянные напряжения; T – период повторения; t – постоянная времени генератора экспоненциального напряжения.

Напряжения, определяемые соотношениями (6.3) и (6.4), подаются на входы нуль-органов НО1 и НО2, на другие входы которых поступают входное $U_{вх}$ и выходное $U_{вых}$ напряжения преобразователя. При появлении импульса на выходе дифференциатора импульсов Д, соответствующего заднему фронту, нуль-органы формируют передние фронты выходных импульсов и при равенстве напряжений на своих входах – задние фронты.

Напряжения импульсов на выходах первого и второго нуль-органов соответственно равны:

$$\Delta\tau_1 = t \ln \frac{U_1}{U_{вх}}; \quad (6.5)$$

$$\Delta\tau_2 = \frac{U_{вх}}{U_m} T. \quad (6.6)$$

Эти импульсы поступают на элементы И1, И2 и И5. На выходах этих элементов формируются импульсы, длительность которых равна соответственно

$$\tau_1 = \Delta\tau_1 - \Delta\tau_2 \quad \text{при} \quad \Delta\tau_1 > \Delta\tau_2; \quad (6.7)$$

$$\tau_2 = \Delta\tau_2 - \Delta\tau_1 \quad \text{при} \quad \Delta\tau_2 > \Delta\tau_1. \quad (6.8)$$

На выходах логических элементов И3 и И4 от генератора опорной частоты ГОЧ формируются пачки импульсов, поступающие на суммирующий или вычитающий входы реверсивного счетчика РС. Импульсы с выходов второго и третьего элементов И1 и И5 через элемент ИЛИ поступают на дифференциатор импульсов Д, который запускает генераторы экспоненциального и линейно изменяющегося напряжений, осуществляет перенос кода из реверсивного счетчика РС в регистр памяти РгП и устанавливает реверсивный счетчик РС в исходное положение. В зависимости от знака разности длительностей импульсов элементов И1 и И5 регистр памяти РгП изменяет в ту или иную сторону величину цифру-управляемого сопротивления ЦУС.

Описанный цикл работы повторяется при запуске генераторов экспоненциального и линейно изменяющегося напряжений сразу же после окончания цикла вычисления. На выходе преобразователя поддерживается напряжение, при котором на выходах нуль-органов формируются импульсы равных длительностей:

$$U_{вых} = \frac{U_m \tau}{T} \ln \frac{U_{вх}}{U_1}.$$

В описанном логарифмическом преобразователе запуск генераторов экспоненциального и линейно изменяющегося напряжений производится автоматически после появления заднего фронта одного из импульсов, формируемого нуль-органами, что существенно повышает быстродействие измерений.

Функциональная схема логарифмирующего устройства, описанного в работе [104], приведена на рис. 6.16.

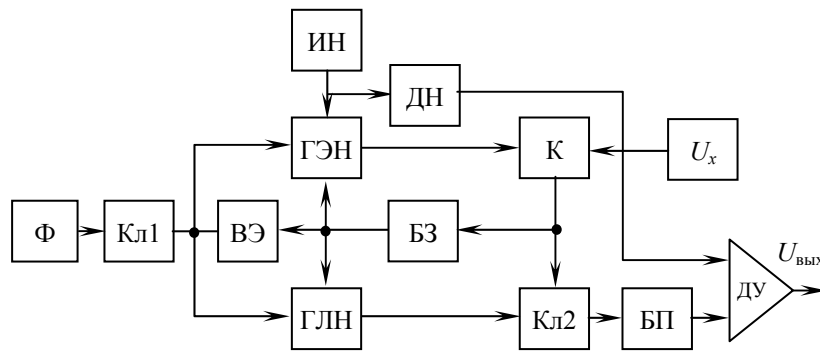


Рис. 6.16. Логарифмирующее устройство

Формирователь Φ одиночных импульсов через ключевой элемент Кл1 запускает генераторы экспоненциального (ГЭН) и линейного напряжений (ГЛН). С помощью компаратора К происходит сравнение выходного напряжения генератора экспоненциального напряжения и сигнала источника U_x преобразуемого напряжения. В момент равенства этих напряжений на выходе компаратора формируется импульс, который замыкает второй ключевой элемент Кл2. Выходной импульс компаратора через блок задержки БЗ передним фронтом переводит генераторы экспоненциального и линейного напряжений в исходное «нулевое» состояние, а задним фронтом через отсекающий вентиляльный элемент ВЭ осуществляется новый запуск этих генераторов.

За время действия импульса компаратора блок памяти БП запомнит значение выходного сигнала линейного напряжения, которое определяется параметрами генераторов ГЭН и ГЛН. Этот сигнал поступает на один вход дифференциального усилителя ДУ, на второй вход которого подается сигнал от источника постоянного напряжения ИН через делитель ДН.

При соответствующем подборе параметров генераторов экспоненциального и линейного напряжений и выборе коэффициента усиления выходного дифференциального усилителя выходное напряжение этого усилителя, т.е. выходное напряжение устройства, пропорционально логарифму от величины сигнала источника преобразуемого напряжения U_x . Процессы измерений устройством повторяются периодически.

Устройство для логарифмирования частотных сигналов [105] показано на рис. 6.17.

В начальный момент времени на выходах триггеров Тг1 и Тг2 установлено напряжение, соответствующее логическому «нулю», в счетчике импульсов Сч записано некоторое постоянное число, генератор ступенчатого напряжения ГСН не формирует напряжение, так как блокирован триггером Тг5 по своему дополнительному (установочному) входу.

После появления на одном из входов компаратора К экспоненциального напряжения и одновременно видеоимпульса на входе блока задержки БЗ и на первом входе триггера Тг2 последний переключается. На выходе генератора ГСН формируется ступенчатое напряжение, а на выходе функционального преобразователя ФПЧ появляется поток импульсов от задающего генератора ЗГ через элемент ИЗ.

Напряжение на одном входе компаратора К изменяется по закону убывающей экспоненты, а на втором – по нарастающему ступенчатому закону, зависящему от частоты источника частотных сигналов ИЧС. При равенстве указанных напряжений на выходе компаратора формируется импульс, переключающий триггер Тг1 в «единичное» состояние.

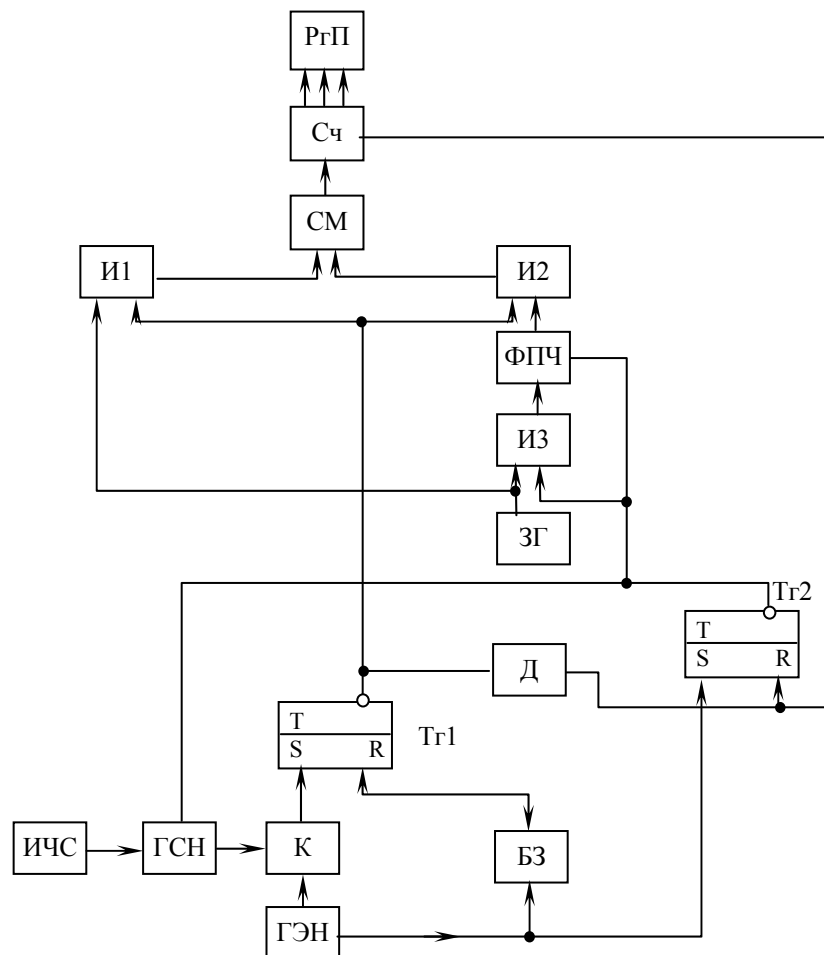


Рис. 6.17. Устройство для логарифмирования частотных сигналов

При этом на входы частотно-импульсного сумматора начинают поступать импульсы с выходов элементов И1 и И2. В следующий момент времени на выходе блока задержки БЗ появляется импульс, задержанный относительно входного видеоимпульса. Этот импульс поступает на второй вход триггера Тг1 и переводит его в «нулевое» состояние. На первые входы элементов И1 и И2 поступают запреты на прохождение импульсов от задающего генератора ЗГ и функционального преобразователя ФПЧ, а на выходе дифференцирующего элемента Д появляется импульс. Продифференцированный по заднему фронту импульс осуществляет одновременно перенос записанного числа из счетчика Сч импульсов в регистр памяти, устанавливая при этом счетчик Сч в исходное состояние, и переключение триггера Тг2 в «нулевое» состояние.

Общее количество импульсов, поступивших на вход счетчика Сч, с учетом принятия линейного характера изменения выходного сигнала генератора ступенчатого напряжения ГСН, пропорционально логарифму от частоты сигналов с выхода источника частотных сигналов ИЧС.

Устройство для вычисления логарифма отношения двух напряжений описано в работе [106].

Логарифмирующее устройство с применением двухквadrантного частотно-импульсного преобразователя напряжения рассмотрено в работе [107].

Антилогарифмический функциональный преобразователь [108] (рис. 6.18) работает следующим образом.

В первом положении переключатель П подключает вход к блоку сравнения БС, а источник опорного напряжения ИОН – к информационному входу интегратора И. Через блок управления БУ запускаются генератор ГОЧ, интегратор И, замыкается ключ Кл, и в реверсивном счетчике РС устанавливается некоторое число. Входное напряжение $U_{вх}$ в пределах одного цикла работы считается постоянным. При этом на реверсивный счетчик РС поступают импульсы с частотой, пропорциональной коду и частоте генератора опорной частоты. На выходе интегратора И формируется линейно изменяющееся напряжение, пропорциональное величине напряжения источника опорного напряжения ИОН. В момент равенства выходного напряжения интегратора и напряжения $U_{вх}$ сигнал с выхода блока сравнения БС поступает на установочный вход интегратора, переводя его в нулевое состояние, и на вход блока управления БУ, в результате чего ключ Кл размыкается.

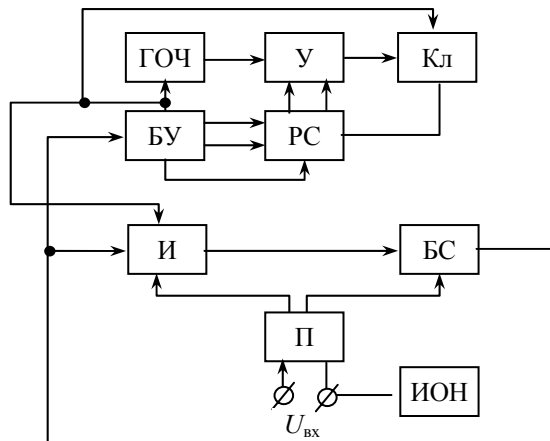


Рис. 6.18. Антилогарифмический преобразователь

В режиме сложения реверсивного счетчика РС код определяется зависимостью

$$N = N_0 \exp(mU_{\text{вх}}), \quad (6.9)$$

где N_0 – начальное число в счетчике РС; m – коэффициент пропорциональности, зависящий от частоты генератора опорной частоты и величины напряжения источника опорного напряжения.

В режиме вычитания

$$N_0 = N_0 \exp(-mU_{\text{вх}}). \quad (6.10)$$

Во втором положении переключателя П напряжение подается на интегратор И, а напряжение от источника опорного напряжения ИОН подается на блок сравнения БС. При этом на выходе интегратора формируется напряжение, пропорциональное напряжению $U_{\text{вх}}$.

В момент равенства выходного напряжения интегратора и напряжения источника опорного напряжения происходят переключения, аналогичные переключениям в первом положении работы переключателя П. При этом код в реверсивном счетчике РС в режиме сложения определяется как

$$N = N_0 \exp\left(\frac{n}{U_{\text{вх}}}\right), \quad (6.11)$$

где n – коэффициент пропорциональности, зависящий от частоты генератора опорной частоты и величины напряжения источника опорного напряжения.

В режиме вычитания код

$$N = N_0 \exp\left(-\frac{n}{U_{\text{вх}}}\right). \quad (6.12)$$

Предложенный антилогарифмический функциональный преобразователь обладает расширенным классом воспроизводимых функций.

6.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА ИДЕНТИФИКАЦИИ СВОЙСТВ СКРЫТЫХ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ОБЪЕКТОВ

В состав экспериментальной ОЭС идентификации свойств СПО входят: ИК-излучатель, цель и фон, ИК-приемник, ЭВМ и измеритель температуры контактный ИТК (рис. 6.19). В качестве излучателя используется некогерентная кварцевая лампа НКЛ типа УИК-2000 мощностью 900 Вт, излучающая в ИК-диапазоне волн [47].

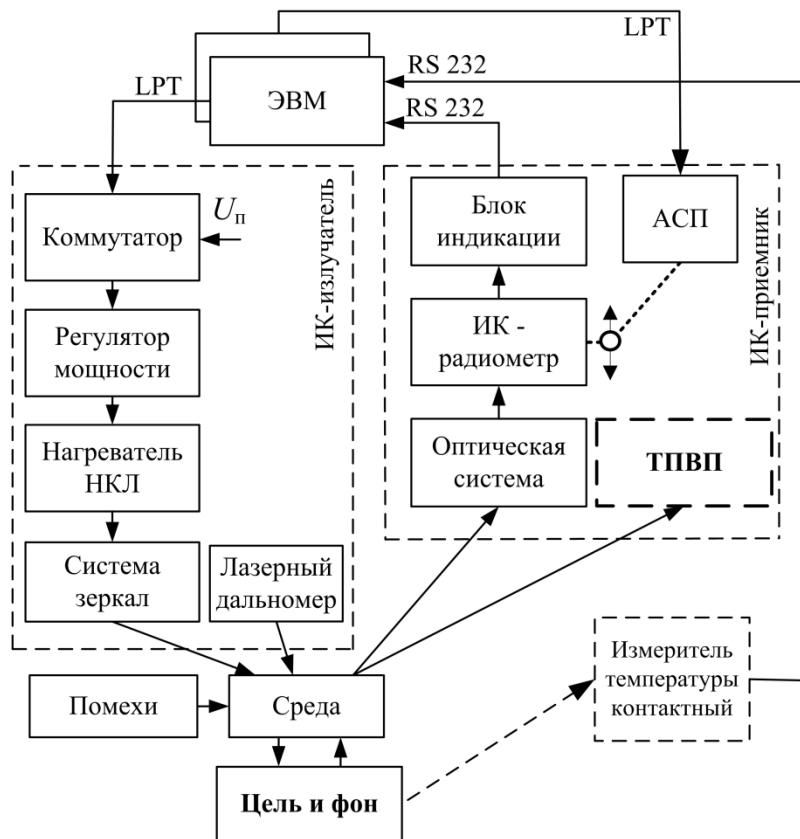


Рис. 6.19. Структурная схема экспериментальной ОЭС

Для измерения ИК-излучения нагреваемого фона со скрытым в нем объектом применяются:

- тепловизионные приборы (ТПВП): AGEMA THERMOVISI-ON 550, спектральный диапазон 3,5...5,0 мкм, чувствительность 0,1 °С; THERMACAM SC 3000, спектральный диапазон 8...9 мкм, чувствительность 0,03 °С;
- ИК-радиометр КЕЛЬВИН-ТЕХНОЛОГИЯ, производящий комплексную обработку в спектральном диапазоне 3...25 мкм с чувствительностью 0,1 °С, при этом ориентация поля зрения радиометра на поверхности фона осуществляется с помощью автоматизированной системы позиционирования АСП.

Для контроля расстояния между ИК-излучателем и поверхностью фона применяется лазерный дальномер. Схема расположения искусственного СПО в кварцевом песке (цель и фон) представлена на рис. 6.20. Параметры физической модели фона составили следующие значения: $\lambda_1 = 0,814 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, $a_1 = 5,81 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, $R = 11 \text{ см}$, $H = 6 \text{ см}$, $b/2 = \mu = 7,5 \text{ мм}$.

Влияние среды на распространение ИК-излучения и внешних помех в ИК-диапазоне не учитывалось в связи с малым расстоянием между приемником и фоном [18]. При больших расстояниях между ИК-приемником и фоном необходимо учитывать искажение истинной температуры в соответствии с работами [83, 109].

Методика проведения эксперимента состоит из трех этапов: подготовительный, непосредственно эксперимент и обработка данных. Подготовительным этапом является термостатирование. При этом производится сравнение температур, измеряемых ИТК внутри фона и на поверхности излучателя. Равенство температур в стационарном тепловом режиме (с порогом $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$) является сигналом на проведение эксперимента. В ходе второго этапа тепловой импульс, формируемый терморегулятором, с помощью лампы НКЛ нагревает поверхность фона в течение заданного времени. В результате измерения ИК-излучения фона производится передача данных через блок индикации в ЭВМ.

Структура ПО функционирования ОЭС и решения задачи идентификации параметров СПО на основе модульного принципа программирования приведена на рис. 6.21.

Так взаимодействие с внешними устройствами возложено на специально разработанные программы-драйверы. Обеспечение функционирования ОЭС реализовано с помощью объектно-ориентированного программирования, что позволяет в реальном режиме времени осуществлять обработку данных от внешних приборов, объединенных в единый виртуальный измерительный комплекс [110 – 112]. Непосредственно задача идентификации СПО в соответствии с моделью, представленной в гл. 5, реализована в среде математической обработки данных MathCAD.

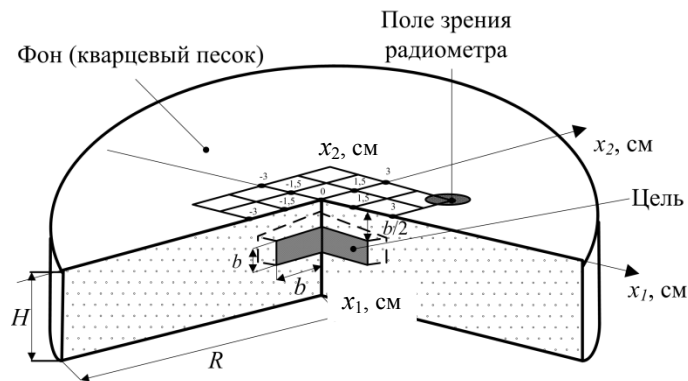


Рис. 6.20. Схема расположения СПО в грунте (цель и фон)

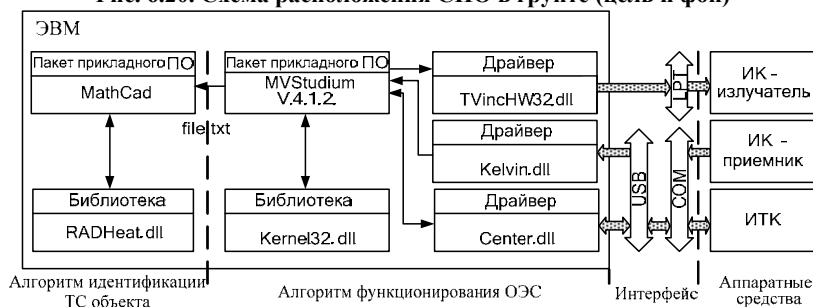


Рис. 6.21. Структура ПО экспериментальной ОЭС

В ходе эксперимента с использованием созданной ОЭС «Воер-ИИС» (рис. 6.22) на глубине 7,5 мм был замаскирован пластмассовый объект (цель № 1 с ТС $\lambda_2 = 0,028 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, $a_2 = 1 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$) с размерами $2,8 \times 2,8 \times 1,5 \text{ см}$. Размер обрабатываемого изображения составил 81×71 пиксель ($12,2 \times 10,7 \text{ см}^2$, область обработки данных № 1 на рис. 6.23). Размер элемента разрешения поверхности грунта составил $1,5 \times 1,5 \text{ мм}^2$.

Перед началом эксперимента грунт не был термостатирован и нагревался в течение 55 с. Для решения задачи идентификации параметров СПО было снято 120 термограмм (рис. 6.24).

Результаты идентификации тепло- и температуропроводности и глубины залегания СПО приведены на рис. 6.25, а – в, соответственно множества T_λ , T_a и G . Изображение трехмерной проекции идентифицированных СПО $\Theta_\lambda(n_1, n_2, n_3)$ представлено на рис. 6.25, г. В проекции отображается местоположение L_i в виде точек, ориентированных в пространстве относительно поверхности грунта, при этом черный цвет точек относится к материалам, классифицированным как теплоизоляторы (пластмасса).

Коэффициент корреляции между эталонным изображением элемента обнаружения квадратной формы размерами 19×19 пикселей и изображением СПО по термограмме (рис. 6.24, з) составил 0,54; изображением СПО по глубинограмме (рис. 6.25, в) составил 0,72.

На рис. 6.26 приведены результаты сравнения вероятности правильного обнаружения СПО на основе метода тепловых контрастов с использованием критерия:



Рис. 6.22. Внешний вид ОЭС идентификации свойств СПО «Воер-ИИС»

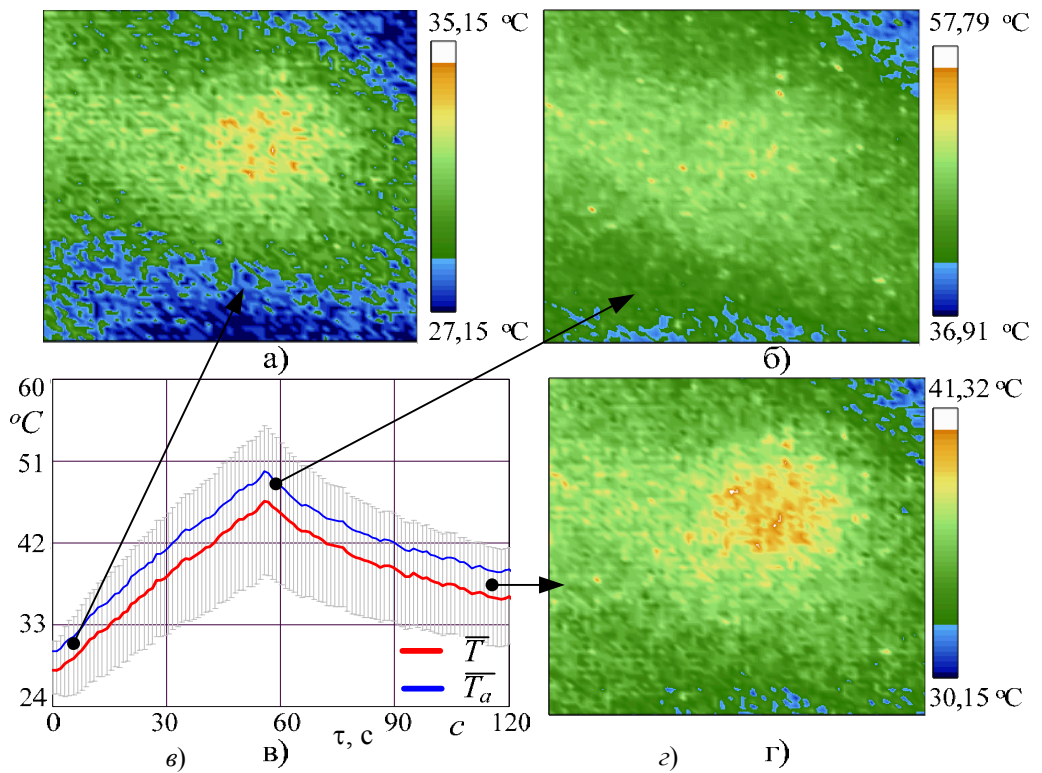
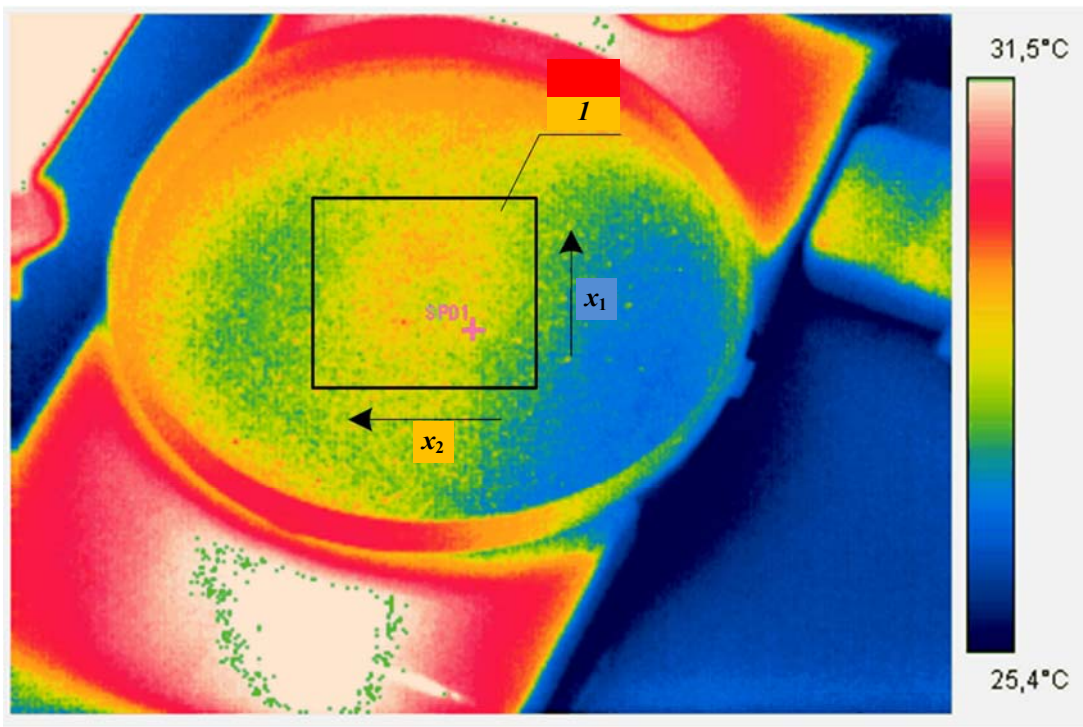
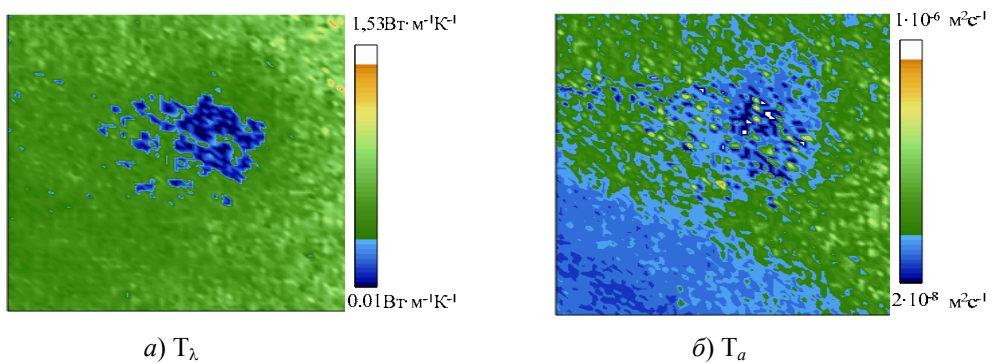


Рис. 6.24. Термограммы поверхности фона (СПО – цель № 1)



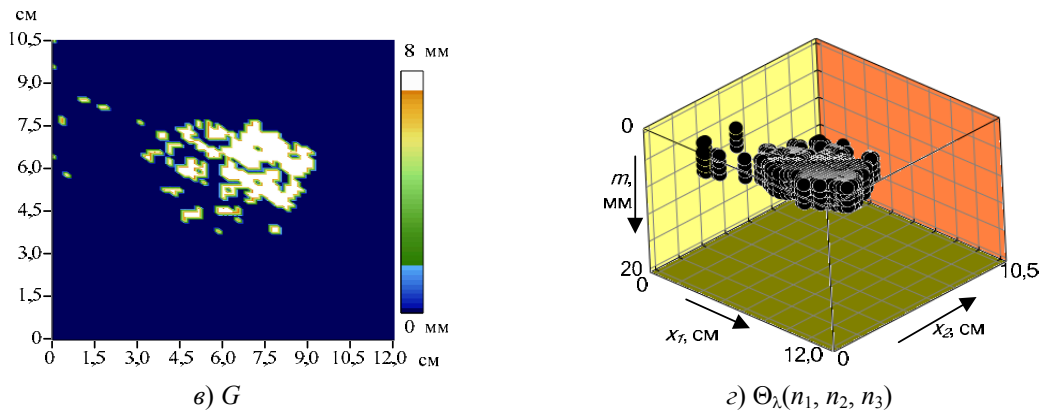


Рис. 6.25. Результаты идентификации ТС и реконструкции СПО (цель № 1)

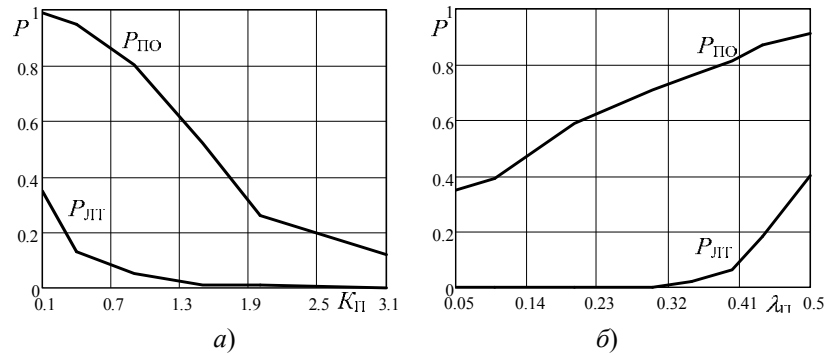


Рис. 6.26. Результаты оценки вероятности правильного обнаружения СПО (цель № 1)

$$T(n_1, n_2) > \bar{T} + K_{\Pi} \sigma_T$$

и на основе методики идентификации параметров СПО с использованием критерия

$$\lambda(n_1, n_2) < \lambda_{\Pi}.$$

Из анализа полученных данных следует, что при вероятности ложной тревоги $P_{\text{лт}} = 0,02$ вероятность правильного обнаружения $P_{\text{по}}$ СПО составила:

- методом тепловых контрастов 0,55 (рис. 6.26, а);
- предлагаемой методикой идентификации СПО 0,76 (рис. 6.26, б).

В ходе второго эксперимента, также на глубине 7,5 мм, был замаскирован металлический объект (цель № 2 с ТС $\lambda_2 = 237 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, $a_2 = 85,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$) размерами $2,8 \times 2,8 \times 1,5$ см. Размер обрабатываемого изображения составил 81×71 пиксель ($12,2 \times 10,7 \text{ см}^2$).

Перед началом эксперимента грунт был термостатирован, после чего нагревался в течение 120 с. Для решения задачи идентификации СПО было снято 300 термограмм (рис. 6.27).

Изображения тепловых томограмм по идентифицированным значениям тепло- и температуропроводности и глубине залегания СПО (глубинограмма) приведены на рис. 6.28, а – в, соответственно множества T_{λ} , T_a и G . Изображение трехмерной проекции $\Theta_{\lambda}(n_1, n_2, n_3)$ представлено на рис. 6.28, г. На реконструкции черным цветом отображены точки L_i , относящиеся к материалам класса теплоизоляторов (пластмасса), а красного цвета – класса теплопроводников (металл).

Коэффициент корреляции между эталонным изображением элемента обнаружения квадратной формы размерами 19×19 пиксель и изображением СПО по термограмме (рис. 6.27, з) составил 0,59; изображением СПО по глубинограмме (рис. 6.28, в) составил 0,83.

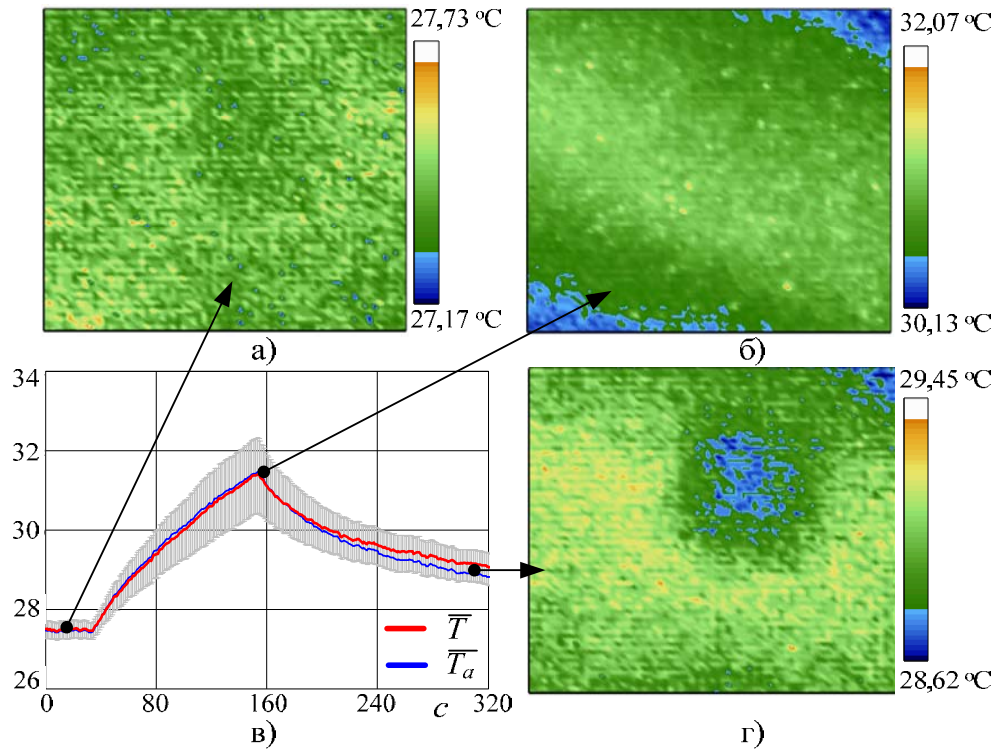


Рис. 6.27. Термограммы поверхности фона (СПО – цель № 2)

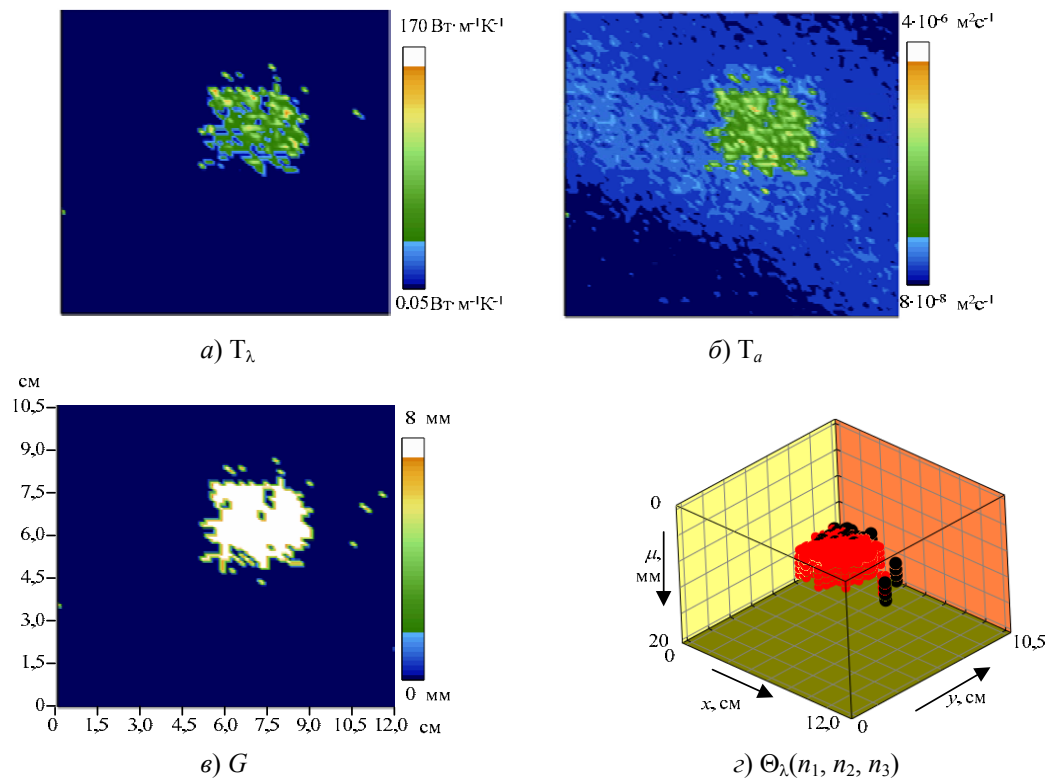


Рис. 6.28. Результаты идентификации ТС и реконструкции СПО (цель № 2)

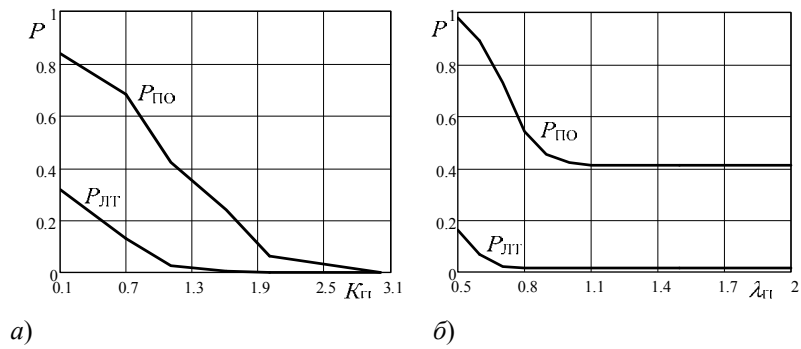


Рис. 6.29. Результаты оценки вероятности правильного обнаружения СПО (цель № 2)

На рис. 6.29 приведены результаты сравнения вероятности правильного обнаружения СПО на основе метода тепловых контрастов с использованием критерия:

$$T(n_1, n_2) < \bar{T} - K_{п} \sigma_T$$

и на основе методики идентификации параметров СПО с использованием критерия

$$\lambda(n_1, n_2) > \lambda_{п}.$$

Из анализа полученных данных следует, что при $P_{лг} = 0,02$ вероятность правильного обнаружения СПО составила:

- методом тепловых контрастов 0,40 (рис. 6.29, а);
- предлагаемой методикой идентификации СПО 0,73 (рис. 6.29, б).

С целью проверки возможности метода идентификации свойств подповерхностных объектов, замаскированных слоем грунта, был проведен эксперимент с использованием крупноразмерных объектов.

В ходе натурального эксперимента по идентификации свойств СПО в сухом грунте на глубине 5 см были замаскированы пластмассовый объект (полиспен) диаметром 13 см и высотой 3 см, металлический (сталь) диаметром 12 см и высотой 5 см, а на глубине 10 см – силикатный кирпич размерами $8 \times 8 \times 5$ см. Фотография испытуемых объектов на поверхности грунта в местах их закладки приведена на рис. 6.30, а. Нагрев грунта производился ИК-излучателем TOP-1 мощностью 900 Вт. Измерение температуры на поверхности грунта производилось пирометром UNI-T: спектральный диапазон 8 – 14 мкм, чувствительность измерений $0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$, погрешность измерения $\pm 1,8 \%$, время одного измерения 250 мс. Размер элемента разрешения на поверхности грунта составил $7 \times 7 \text{ см}^2$.

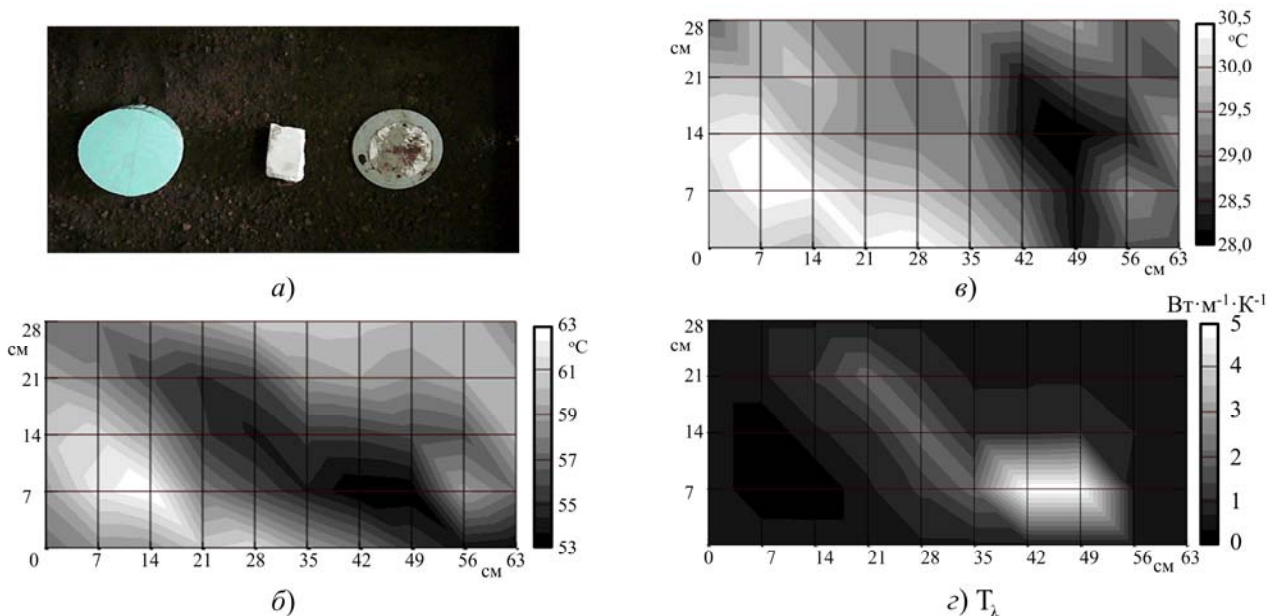


Рис. 6.30. Данные эксперимента по идентификации свойств СПО в грунте

Перед началом эксперимента грунт был термостатирован, после чего нагревался в течение двух часов. Для решения задачи идентификации параметров СПО было снято две термограммы, на стадии нагрева (рис. 6.30, б) и на стадии остывания (рис. 6.30, в). Сплайн-интерполяция изменения значений \bar{T} во времени приведена на рис. 6.31.

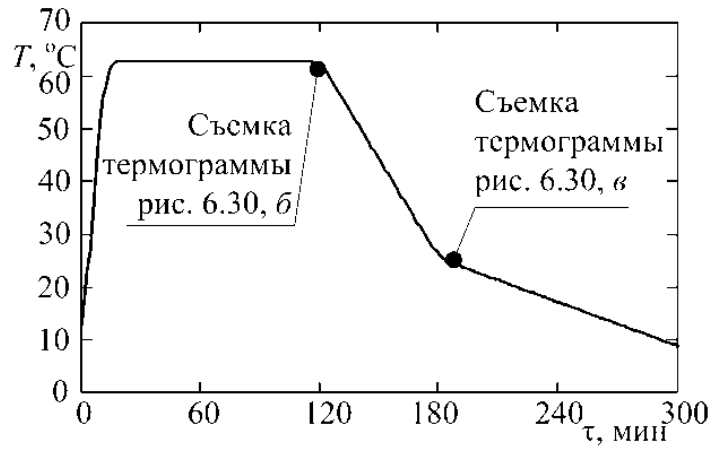


Рис. 6.31. Сплайн-интерполяция измерения температуры во времени

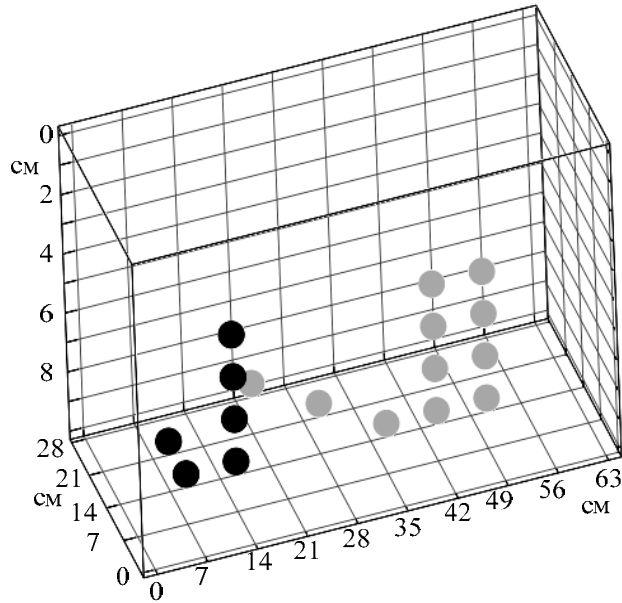


Рис. 6.32. Результаты реконструкции СПО, $\Theta_{\lambda}(n_1, n_2, n_3)$

Проведя идентификацию ТС СПО, было получено изображение тепловой томограммы T_{λ} (рис. 6.30, з). На рис. 6.32 приведено отображение трехмерной реконструкции местоположения СПО в пространстве, где черным цветом представлены L_i , классифицированные как теплоизоляторы (пластмасса), а серым – теплопроводники (металл).

Таким образом, на основе разработанной модели поиска подповерхностных объектов в ИК-диапазоне волн произведена идентификация тепловых свойств, геометрических размеров и глубины залегания испытуемых скрытых подповерхностных объектов, значения которых достоверно отображают их местоположение и класс материала на глубинах от 5 до 10 см.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одними из наиболее трудных для численного моделирования являются коэффициентные обратные задачи уравнений математической физики [113 – 117]. Для данного класса задач типичным является нарушение требования непрерывной зависимости решения от входных данных. Введение в класс корректных задач достигается сужением класса допустимых решений путем применения алгоритмов регуляризации [14, 115, 118, 119].

Решение нелинейных коэффициентных задач теплопереноса с учетом наличия инородного объекта в структуре основного материала позволяет одновременно решить задачу идентификации тепловых свойств, а на их основе задачу идентификации параметров скрытого подповерхностного объекта.

Практические тепловые измерения в инфракрасном диапазоне волн показывают эффективность термографической съемки, связанной с обнаружением металлических или пластмассовых объектов, замаскированных слоем грунта. Основная причина применения инфракрасных систем для решения задачи обнаружения подповерхностных объектов заключается в том, что тепловые свойства грунта по шкале теплопроводности находятся посередине между тепловыми свойствами металлов и пластмасс, при этом их значения на один-два порядка отличаются друг от друга.

Термографические методы обнаружения основываются на сравнении измеряемых температур с заданным порогом. Однако низкая чувствительность инфракрасных систем и небольшие значения температурных контрастов снижают их эффективность как обнаружителей.

Одним из направлений повышения вероятности обнаружения является применение методов вычислительной теплофизики для идентификации тепловых свойств как грунта, так и скрытых подповерхностных объектов по данным термографической съемки. Практические эксперименты по идентификации тепловых свойств, формированию тепловых томограмм и реконструкции скрытых подповерхностных объектов, приведенные в работе, подтверждают эту возможность.

Основным результатом работы является разработка теоретических и методологических основ обработки информации в оптико-электронных системах инфракрасного диапазона волн на основе детерминированных моделей, предназначенных для идентификации параметров скрытых подповерхностных объектов и технического диагностирования теплоизоляционных материалов, что позволило решить следующие задачи:

1. Разработана схема обработки информации для решения задачи обнаружения скрытых подповерхностных объектов в грунте, отличающаяся от известных тем, что принятие решения о наличии объекта в структуре грунта производится путем численного решения прямой и коэффициентной обратной задач теплопроводности, что дает возможность по идентифицированным тепловым свойствам и геометрическим параметрам, глубине залегания объекта определить его размеры, а также классифицировать по виду материала (пластмасса, металл) и произвести реконструкцию местоположения в трехмерном пространстве.

2. Разработана трехмерная и одномерная дискретные модели нелинейной задачи теплопроводности при нагреве излучением плоской поверхности грунта и его конвективном теплообмене с окружающей средой с учетом скрытого подповерхностного объекта, что является основой вторичной обработки информации от оптико-электронных систем инфракрасного диапазона волн на основе положений теории вариационного исчисления.

3. Синтезированы алгоритмы решения обратной коэффициентной задачи по идентификации свойств скрытых подповерхностных объектов в грунте. На основании разработанных алгоритмов при обработке информации от тепловизионных приборов стало возможным получать изображения:

– тепловых томограмм, в которых каждый пиксель отображает значение тепловых свойств скрытого объекта и грунта;

– глубинограмм, в которых каждый пиксель отображает значение глубины залегания объекта в грунте;

– трехмерной реконструкции местоположения скрытого объекта по глубине прогрева грунта.

Полученные изображения позволяют увеличить коэффициент контрастности в изображениях тепловых свойств грунта и местам положения скрытого подповерхностного объекта в 20 раз по сравнению с известным методом тепловых контрастов. Кроме того, повышается вероятность обнаружения пластмассового скрытого подповерхностного объекта в 1,38 раза, металлического – в 1,82 раза при вероятности ложной тревоги 0,02 по сравнению с методом тепловых контрастов.

4. Разработаны трехмерная и двумерная численные модели нелинейной задачи теплопроводности для материалов с разрывными коэффициентами и внутренними источниками тепла, а также синтезированы алгоритмы решения обратной коэффициентной задачи для идентификации тепловых свойств материалов.

5. Экспериментально подтверждена техническая реализуемость оптико-электронных систем идентификации свойств скрытых подповерхностных объектов, создана и испытана ОЭС «Воен-IIS», позволяющая применив вторичную обработку информации, обнаруживать и классифицировать по виду материалов объекты, замаскированные в грунте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вавилов, В.П. Тепловые методы неразрушающего контроля : справочник / В.П. Вавилов. – М. : Машиностроение, 1991. – 240 с.
2. Тепловой неразрушающий контроль изделий / О.Н. Будадин и др. – М. : Наука, 2002. – 472 с.
3. Вавилов, В.П. Тепловые методы контроля композитных структур и изделий радиоэлектроники / В.П. Вавилов. – М. : Радио и связь, 1984. – 152 с.
4. Хадсон, Р. Инфракрасные системы : пер. с англ. / Р. Хадсон. – М. : Мир, 1967. – 534 с.
5. Госсорг, Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение : пер. с фр. / Ж. Госсорг. – М. : Мир, 1988. – 416 с.
6. Бекешко, Н.А. Инфракрасный метод обнаружения скрытых дефектов в сопротивлениях / Н.А. Бекешко, П.К. Ощепков // Дефектоскопия. – 1965. – № 5. – С. 30 – 33.
7. Бекешко, Н.А. Современное состояние методов контроля температурных полей интегральных схем / Н.А. Бекешко // Дефектоскопия. – 1970. – № 1. – С. 30 – 37.
8. Бекешко, Н.А. Активный тепловой контроль неметаллических материалов / Н.А. Бекешко // Дефектоскопия. – 1981. – № 9. – С. 86 – 90.
9. Вавилов, В.П. Двумерная задача тепловой дефектоскопии при конвективном теплообмене изделия с окружающей средой / В.П. Вавилов, В.И. Горбунов, Б.Н. Епифанцев // Дефектоскопия. – 1976. – № 4. – С. 40 – 47.
10. Вавилов, В.П. Тепловые методы неразрушающего контроля многослойных структур : обзор / В.П. Вавилов, В.И. Горбунов // Дефектоскопия. – 1981. – № 4. – С. 5 – 22.
11. Ширококов, А.М. Оптико-электронные приборы инфракрасного диапазона для решения задач экологии / А.М. Ширококов, Е.А. Барбашов // Радиосистемы. – 1999. – № 11. – С. 90 – 94.
12. Использование многоспектрального тепловизора «Терма-2» для контроля магистральных нефтепроводов / А.М. Ширококов и др. // Известия вузов. Серия Приборостроение. – 2002. – Т. 45, № 2. – С. 12 – 16.
13. Ширококов, А.М. Алгоритм управления инфракрасным прицельным устройством, предназначенным для тушения пожаров / А.М. Ширококов // Известия вузов. Серия Приборостроение. – 2002. – Т. 45, № 2. – С. 22 – 28.
14. Самарский, А.А. Численные методы решения обратных задач математической физики / А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич. – М. : Едиториал УРСС, 2004. – 480 с.
15. Тепловой неразрушающий контроль теплозащитных покрытий турбинных лопаток / В.П. Вавилов и др. // Дефектоскопия. – 2005. – № 7. – С. 74 – 83.
16. Казаров, Ю.К. Принципы многоразового использования космических аппаратов: концептуальные аспекты при авиационных происшествиях / Ю.К. Казаров, О.Н. Будадин, Т.Е. Троицкий-Марков // Проблемы безопасности полетов. – 2005. – Вып. 3. – С. 9 – 26.
17. Применение метода эталонного слоя для определения теплофизических характеристик материалов многослойных структур / В.Г. Авраменко и др. // Дефектоскопия. – 2006. – № 6. – С. 75 – 92.
18. Вавилов, В.П. Инфракрасная термографическая диагностика в строительстве и энергетике / В.П. Вавилов, Д.Н. Александров. – М. : Энергопрогра. Энергетик, 2003. – 75 с.
19. Жуков, С. Современные средства противоминной борьбы / С. Жуков // Зарубежное военное обозрение. – 1997. – № 5. – С. 10 – 15.
20. Васильев, А. Япония создает роботы-саперы для обнаружения противопехотных мин / А. Васильев // Зарубежное военное обозрение. – 2000. – № 10. – С. 16.
21. Дикарев, В.И. Безопасность, защита и спасение человека / В.И. Дикарев. – СПб. : Наука и техника, 2007. – 574 с.
22. Пат. 2122224 РФ, МПК⁷ G 01 V 3/12, G 01 N 22/00. Способ обнаружения мин в почве / О.А. Морозов, М.Ф. Воскобойник ; заявитель и патентообладатель НПО «Маргатеб». – № 97121734/25 ; заявл. 25.11.98 ; опубл. 20.11.98, Бюл. № 23. – 3 с.
23. Неразрушающий контроль. Россия 1990 – 2000 гг. : справочник / под ред. В.В. Ключева и др. – М. : Машиностроение, 2001. – 656 с.
24. Коздоба, Л.А. Вычислительная теплофизика / Л.А. Коздоба. – Киев : Наукова думка, 1992. – 242 с.
25. Теплофизические измерения и приборы / Е.С. Платунов и др. ; под общ. ред. Е.С. Платунова. – Л. : Машиностроение, 1986. – 255 с.
26. Мищенко, С.В. Расчет теплофизических свойств веществ / С.В. Мищенко, И.А. Черепенников, С.Н. Кузьмин. – Воронеж : Изд-во ВГУ, 1991. – 208 с.
27. Платунов, Е.С. Теплофизические измерения в монотонном режиме / Е.С. Платунов. – Л. : Энергия, 1973. – 143 с.
28. Мищенко, С.В. Анализ и синтез измерительных систем / С.В. Мищенко и др. – Тамбов : ТГТУ, 1995. – 256 с.
29. Глинкин, Е.Н. Микропроцессоры в приборостроении: практическое руководство к применению / Е.Н. Глинкин, Б.И. Герасимов. – М. : Машиностроение, 2000. – 328 с.
30. Ищук, И.Н. Принципы обработки информации на основе численного решения нелинейной задачи теплопроводности. Ч. 1 : Трехмерная дискретная математическая модель / И.Н. Ищук // Измерительная техника. – 2007. – № 10. – С. 42 – 46.
31. Ищук, И.Н. Принципы обработки информации на основе численного решения нелинейной задачи теплопроводности. Ч. 2 : Коэффициентная задача функциональной оптимизации в вариационной постановке / И.Н. Ищук // Измерительная техника. – 2008. – № 2. – С. 48 – 50.
32. Вавилов, В.П. Тепловизоры и их применение / В.П. Вавилов, А.Г. Климов. – М. : Интелуниверсал, 2002. – 87 с.
33. Экспериментальная тепловая томография твердых тел при импульсном одностороннем нагреве / В.П. Вавилов и др. // Дефектоскопия. – 1990. – № 12. – С. 60 – 66.
34. Ищук, И.Н. Принципы обнаружения дефектов в материалах при помощи термографии // Измерительная техника. – 2008. – № 4. – С. 49 – 53.

35. Прэтт, У. Цифровая обработка изображений : пер. с англ. – М. : Мир, 1982. – Кн. 2. – 480 с.
36. Лыков, А.В. Тепломассообмен : справочник / А.В. Лыков. – 2-е изд. – М. : Энергия, 1976. – 480 с.
37. Фесенко, А.И. Частотно-импульсный метод определения теплофизических характеристик твердых материалов / А.И. Фесенко, С.С. Маташков // Инженерно-физический журнал. – 1998. – Т. 71, № 2. – С. 338.
38. Коздоба, Л.А. Решения нелинейных задач теплопроводности / Л.А. Коздоба. – Киев : Наукова думка, 1976. – 136 с.
39. Карташов, Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел / Э.М. Карташов. – М. : Высшая школа, 2001. – 549 с.
40. Дульнев, Г.Н. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена : учеб. пособие / Г.Н. Дульнев, В.Г. Парфенов. – М. : Высшая школа, 1990. – 207 с.
41. Кудряшов, Л.И. Приближенные решения нелинейных задач теплопроводности / Л.И. Кудряшов, Н.Л. Меньших. – М. : Машиностроение, 1979. – 232 с.
42. Режимы с обострением в задачах для квазилинейных параболических уравнений / А.А. Самарский, В.А. Галактионов, С.П. Курдюмов, А.П. Михайлов. – М. : Наука : Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 480 с.
43. Ши, Д. Численные методы в задачах теплообмена / Д. Ши. – М. : Мир, 1988. – 544 с.
44. Власов, Е.А. Приближенные методы математической физики / Е.А. Власов, В.С. Зарубин, Г.И. Кувыркин. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 700 с.
45. Гропп, Д. Методы идентификации систем / Д. Гропп ; пер. с англ. В.А. Васильева ; под ред. Е.И. Кринецкого. – М. : Мир, 1979. – 240 с.
46. Ищук, И.Н. Обнаружение и распознавание подповерхностных объектов радиотеплолокаторами на основе идентификации тепловых свойств / И.Н. Ищук // Радиотехника. – 2008. – № 5. – С. 56 – 60.
47. Ищук, И.Н. Профилирование глубины с помощью оптико-электронной системы тепловой подповерхностной локации / И.Н. Ищук, А.И. Фесенко, А.С. Скрипкин // Радиотехника. – 2008. – № 5. – С. 61 – 65.
48. Ищук, И.Н. Тепловой неразрушающий контроль теплофизических свойств материалов на основе многофакторных функций преобразования / И.Н. Ищук, А.И. Фесенко // Измерительная техника. – 2005. – № 7. – С. 44 – 46.
49. Ищук, И.Н. Математическое моделирование задачи теплопроводности с разрывными коэффициентами / И.Н. Ищук, А.И. Фесенко // Повышение эффективности средств обработки информации : материалы VII всерос. науч.-техн. конф. 27 – 29 апреля 2004 г. – Тамбов : ТВАИИ, 2004. – Ч. 1. – С. 542 – 551.
50. Шашков, А.Г. Волновые явления теплопроводности: системно-структурный подход / А.Г. Шашков, В.А. Бубнов, С.Ю. Яновский. – 2-е изд., доп. – М. : Едиториал УРСС, 2004. – 296 с.
51. Гурьев, В.В. Тепловая изоляция в промышленности. Теория и расчет / В.В. Гурьев, В.С. Жолудов, В.Г. Петров-Денисов. – М. : Стройиздат, 2003. – 416 с.
52. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ 2008610687. Численная модель двумерной (трехмерной) нелинейной задачи теплопроводности с разрывными коэффициентами (Boer2D / Boer3D) / И.Н. Ищук, Ю.Ю. Громов. – № 2007615095 ; заявл. 12.12.2007 ; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 7.02.2008.
53. Ищук, И.Н. Программная реализация методов диагностирования теплофизических свойств материалов / И.Н. Ищук // Повышение эффективности средств обработки информации на базе математического моделирования : материалы VIII всерос. науч.-техн. конф. 26 – 28 апреля 2006 г. – Тамбов : ТВВАИУРЭ (ВИ), 2006. – Ч. 2.
54. Ищук, И.Н. Задача теплопроводности с граничными условиями сопряжения: математическое моделирование и эксперимент / И.Н. Ищук, А.И. Фесенко // Теплофизические измерения при контроле и управлении : материалы междунар. теплофиз. школы, 20 – 24 сентября 2004 г. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. – Ч. 1. – С. 119 – 122
55. Самарский, А.А. Вычислительная теплопередача / А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич. – М. : Едиториал УРСС, 2003. – 610 с.
56. Ищук, И.Н. Оценка устойчивости решения коэффициентной задачи теплопроводности на основе использования дискретных математических моделей / И.Н. Ищук // Вестник ТВВАИУРЭ (ВИ). – Тамбов : ТВВАИУРЭ. – 2007. – № 2. – С. 29 – 35.
57. Алифанов, О.М. Идентификация процессов теплообмена летательных аппаратов. – М. : Машиностроение, 1979. – 216 с.
58. Самарский, А.А. Математическое моделирование: идеи, методы, примеры / А.А. Самарский, А.П. Михайлов. – 2-е изд, испр. – М. : Физматлит, 2002. – 320 с.
59. Новицкий, П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Л. : Энергоатомиздат, 1985. – 183 с.
60. Ищук, И.Н. Многофакторные измерения при идентификации переменных на линиях неопределенности / И.Н. Ищук // Метрология. – 2003. – № 12. – С. 3 – 8.
61. Пат. 2284030 РФ, МПК⁷ G 01 N 25/18. Способ определения комплекса теплофизических свойств твердых материалов / И.Н. Ищук, А.И. Фесенко, В.В. Обухов, Ю.В. Чудинов, Л.В. Обухова ; заявитель и патентообладатель ОАО «Ракетно-космическая корпорация "Энергия" им. С.П. Королева» – № 2004109778/28 ; заявл. 30.03.2004 ; опубл. 20.09.2006, Бюл. № 26. – 10 с.
62. Тартаковский, Д.Ф. Метрология, стандартизация и технические средства измерений : учебник для вузов / Д.Ф. Тартаковский, А.С. Ястребов. – М. : Высшая школа, 2002. – 205 с.
63. Ищук, И.Н. Идентификация теплофизических свойств материалов на основе использования вариационных методов исчисления / И.Н. Ищук // Измерительная техника. – 2007. – № 7. – С. 34 – 36.
64. Пат. 2303777 РФ, G 01 N 25/00. Способ идентификации комплекса теплофизических свойств твердых материалов / В.В. Обухов, И.Н. Ищук, А.И. Фесенко, А.П. Собко, Б.И. Антонов ; заявитель и патентообладатель ОАО «Ракетно-космическая корпорация "Энергия" им. С.П. Королева». – № 2005117325/28 ; заявл. 6.06.05 ; опубл. 27.07.07, Бюл. № 21.

65. Пат. 2324164 РФ, G 01 N 25/00. Способ идентификации комплекса теплофизических свойств твердых материалов / И.Н. Ищук ; заявитель и патентообладатель ТВВАИУРЭ (ВИ). – № 2006135901/28 ; заявл. 10.10.06 ; опубл. 10.05.08, Бюл. № 13.
66. Пат. 2324165 РФ, G 01 N 25/00. Способ идентификации комплекса теплофизических свойств твердых материалов / И.Н. Ищук ; заявитель и патентообладатель ТВВАИУРЭ (ВИ). – № 2006138252/28 ; заявл. 30.10.06 ; опубл. 10.05.08, Бюл. № 13.
67. Пат. 2324166 РФ, G 01 N 25/00. Способ идентификации комплекса теплофизических свойств твердых материалов / И.Н. Ищук, А.И. Фесенко, С.М. Лобанов, А.С. Скрипкин ; заявитель и патентообладатель ТВВАИУРЭ (ВИ). – № 2006140063/28 ; заявл. 13.11.06 ; опубл. 10.05.08, Бюл. № 13.
68. Пат. 2328724 РФ, G 01 N 25/00. Способ идентификации комплекса теплофизических свойств твердых материалов / И.Н. Ищук, А.И. Фесенко, С.М. Лобанов, А.С. Скрипкин ; заявитель и патентообладатель ТВВАИУРЭ (ВИ). – № 2006143915/28 ; заявл. 11.12.06 ; опубл. 10.07.08, Бюл. № 19.
69. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ 2008611320. Численный алгоритм решения обратной коэффициентной задачи теплопроводности с разрывными коэффициентами (Ident) / И.Н. Ищук, Ю.Ю. Громов. – № 2007615094 ; заявл. 12.12.2007 ; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 17.03.2008.
70. Федоренко, Р.П. Приближенное решение задач оптимального управления / Р.П. Федоренко. – М. : Наука, 1978. – 488 с.
71. Громов, Ю.Ю. Решение задач гарантирующей оптимизации в условиях неопределенности / Ю.Ю. Громов, В.И. Бодров, В.А. Погонин // Инженерная физика. – 2003. – № 2. – С. 46 – 49.
72. Самарский, А.А. Введение в численные методы / А.А. Самарский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1987. – 220 с.
73. Карслоу, Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – М. : Наука, 1964. – 488 с.
74. Кулаков, М.В. Измерение температуры поверхности твердых тел / М.В. Кулаков, Б.И. Макаров. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергия, 1979.
75. Современные аспекты методологии восстановления шин / Ю.Ю. Громов, Б.В. Чемеринский, Г.Я. Власов, Л.М. Сырицын, А.П. Денисов. – М. : ООО «НТЦ «НИИ шинной промышленности», 2005. – 211 с.
76. Исаченко, В.П. Теплопередача : учебник для вузов / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергия, 1975.
77. Марчук, Г.И. Методы вычислительной математики : учеб. пособие / Г.И. Марчук. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука : Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 608 с.
78. Ищук, И.Н. Принципы тепловой дефектоскопии и томографии на основе численного решения коэффициентных задач теплопроводности / И.Н. Ищук // Теплофизика в энергосбережении и управлении качеством : тезисы докл. VI междунар. теплофиз. школы, 1 – 6 октября 2007 г. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – Ч. 1. – С. 95 – 98.
79. Справочник физических величин / под ред. проф. Г.А. Рябина. – СПб. : Лениздат ; Изд-во «Союз», 2001. – 99 с.
80. Филиппов, В.Л. Оптическая погода в нижней тропосфере / В.Л. Филиппов, А.С. Макаров, В.П. Иванов. – Казань : Дом печати, 1998. – 230 с.
81. Зуев, В.Е. Распределение видимых и ИК волн в атмосфере / В.Е. Зуев. – М. : Сов. Радио, 1970. – 322 с.
82. Иванов, В.П. Прикладная оптика атмосферы в тепловидении / В.П. Иванов. – Казань : Новое знание, 2000. – 180 с.
83. Мицель, А.А. Современные компьютерные модели пропускания и радиации атмосферы в ИК диапазоне спектра / А.А. Мицель // Оптика и атмосфера океана. – 1994. – № 3.
84. Фираго, В.А. Естественные фоновые помехи в окнах прозрачности атмосферы / В.А. Фираго, Б.Ю. Ханох, В.В. Долинин // Извещения вузов СССР. Радиофизика. – 1984. – Т. 27, № 11.
85. Алигусейнов, А.К. Пространственные спектры вариаций радиационной температуры некоторых типов поверхности суши / А.К. Алигусейнов // Извещения АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1991. – Т. 27, № 6.
86. Епифанцев, Б.Н. О расчетной оценке дисперсии пространственных флюктуаций теплового излучения земной поверхности / Б.Н. Епифанцев // Исследования земли и космоса. – 1985. – № 6.
87. Алеев, Р.М. Воздушная тепловизионная аппаратура для контроля нефтепродуктов / Р.М. Алеев, В.А. Овсяников, В.Н. Чепурский. – М. : Недра, 1995.
88. Алеев, Р.М. Эффективность воздушной тепловизионной аппаратуры при контроле продуктопроводов / Р.М. Алеев, В.А. Овсяников, В.Н. Чепурский // Оптический журнал. – 1993. – № 1.
89. Алеев, Р.М. О контроле нефтепродуктопроводов посредством тепловизионной аппаратуры / Р.М. Алеев, В.Н. Чепурский // Трубопроводный транспорт нефти. – 1994. – № 3.
90. Миронов, Д.А. Исследование тепловых аномалий над дефектными продуктопроводами / Д.А. Миронов, А.В. Серебряков, В.И. Тевяшов // Оптический журнал. – 1993. – № 9.
91. Численные методы в информационных системах : учеб. пособие / Ю.Ю. Громов, В.О. Драчев, О.Г. Иванова, Ю.С. Сербулов, К.А. Набатов. – Тамбов : Першина, 2007. – 150 с.
92. Питьев, Ю.П. Методы математического моделирования измерительно-вычислительных систем / Ю.П. Питьев. – М. : Физматлит, 2002. – 384 с.
93. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ 2005611892. Программный комплекс для проведения теплофизического эксперимента по исследованию теплофизических свойств материалов / И.Н. Ищук, Ю.В. Чудинов. – № 5005611333 ; заявл. 8.06.2005 ; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 12.07.2005.
94. Пат. 2317531 РФ, G 01 K 3/08, G 01 K 7/24. Устройство для измерения разности температур / А.И. Фесенко, И.Н. Ищук, Ю.В. Чудинов ; заявитель и патентообладатель ТВВАИУРЭ (ВИ). – № 2006106082/28 ; заявл. 26.02.06 ; опубл. 20.02.08, Бюл. № 5.

95. Пат. 2311621 РФ, G 01 K 3/08, G 01 K 7/20. Устройство для измерения разности температур / А.И. Фесенко, И.Н. Ищук, Ю.В. Чудинов; заявитель и патентообладатель ТВВАИУРЭ (ВИ). – № 2006104271/28; заявл. 13.02.06; опубл. 27.11.07, Бюл. № 33.
96. Пат. 2300743 РФ, G 01 K 7/02. Устройство для измерения и сигнализации скорости изменения температуры // А.И. Фесенко, И.Н. Ищук, Ю.В. Чудинов; заявитель и патентообладатель ТВВАИУРЭ (ВИ). – № 2006102823/28; заявл. 31.01.06; опубл. 10.06.07, Бюл. № 16.
97. А. с. 732912 СССР, МКИ² G 06 G 7/26, C 06 1/02. Функциональный генератор / А.И. Фесенко. – № 2556859/18-24; заявл. 19.12.77; опубл. 05.05.80, Бюл. № 17
98. А. с. 913409 СССР, МКИ³ G 06 G 7/26. Функциональный генератор / А.И. Фесенко. – № 2955633/18-24; заявл. 28.05.80; опубл. 15.03.82, Бюл. № 10.
99. А. с. 648995 СССР, МКИ² G 06 G 7/24. Экспоненциальный преобразователь / А.И. Фесенко, В.С. Борисюк, Е.И. Глинкин. – № 2556816/18-24; заявл. 19.12.77; опубл. 05.02.79, Бюл. № 7.
100. А. с. 675428 СССР, МКИ G 06 G 7/24. Экспоненциальный частотный преобразователь / А.И. Фесенко, В.Н. Казаков. – № 2577960/18-24; заявл. 06.02.78; опубл. 25.07.79, Бюл. № 27.
101. А. с. 736127 СССР, МКИ² G 06 G 7/22. Косинусный функциональный преобразователь / А.И. Фесенко. – № 2540337/18-24; заявл. 09.11.77; опубл. 25.05.80, Бюл. № 19.
102. А. с. 736132 СССР, МКИ² G 06 J 3/00. Логарифмический аналого-цифровой преобразователь / А.И. Фесенко, Г.В. Кондратьев, В.С. Борисюк. – № 2570780/18-24; заявл. 16.01.78; опубл. 25.05.80, Бюл. № 19.
103. А. с. 913404 СССР, МКИ³ G 06 G 7/24. Логарифмический преобразователь / А.И. Фесенко. – № 2955631/18-24; заявл. 28.05.80; опубл. 15.03.82, Бюл. № 10.
104. А. с. 714417 СССР, МКИ² G 06 G 7/24. Логарифмирующее устройство / А.И. Фесенко. – № 2537541/18-24; заявл. 25.10.77; опубл. 05.02.80, Бюл. № 5.
105. А. с. 732910 СССР, МКИ² G 06 G 7/24. Устройство для логарифмирования частотных сигналов / А.И. Фесенко. – № 2544812/18-24; заявл. 18.11.77; опубл. 05.05.80, Бюл. № 17.
106. А. с. 665305 СССР, МКИ² G 06 G 7/24. Устройство для вычисления логарифма отношения двух напряжений / А.И. Фесенко, Г.В. Кондратьев, В.С. Борисюк. – № 2572424/18-24; заявл. 23.01.78; опубл. 30.05.79, Бюл. № 20.
107. А. с. 894736 СССР, МКИ³ G 06 G 7/24. Логарифмирующий преобразователь / А.И. Фесенко. – № 2916419/18-24; заявл. 27.02.80; опубл. 30.12.81, Бюл. № 48.
108. А. с. 920763 СССР, МКИ³ G 06 G 7/24. Антилогарифмирующий функциональный преобразователь / А.И. Фесенко. – № 2948330/18-24; заявл. 12.05.80; опубл. 15.04.82, Бюл. № 14.
109. Филиппов, В.Л. Учет вариаций «оптической погоды» при обосновании тактико-технических характеристиках оптико-электронных систем / В.Л. Филиппов // Оборонная техника. – 2007. – № 1, 2.
110. Колесов, Ю.Б. Моделирование систем. Объектно-ориентированный подход / Ю.Б. Колесов, Ю. Б. Сечников. – СПб.: ВНУ, 2006. – 192 с.
111. Колесов, Ю.Б. Моделирование систем. Динамические и гибридные системы / Ю.Б. Колесов, Ю. Б. Сечников. – СПб.: ВНУ, 2006. – 224 с.
112. Колесов, Ю.Б. Моделирование систем: практикум по компьютерному моделированию / Ю.Б. Колесов, Ю. Б. Сечников. – СПб.: ВНУ, 2006. – 192 с.
113. Бэк, Д. Некоторые обратные задачи теплопроводности / Д. Бэк, Б. Блакуэлл, Ч. Сент-Клэр; пер. с англ. Е.А. Артюхина. – М.: Мир, 1989. – 312 с.
114. Кудряшов, Л.И. Приближенные решения нелинейных задач теплопроводности / Л.И. Кудряшов, Н.Л. Меньших. – М.: Машиностроение, 1979. – 232 с.
115. Алифанов, О.М. Обратные задачи теплообмена / О.М. Алифанов. – М.: Машиностроение, 1988. – 280 с.
116. Лионс, Ж.Л. Некоторые методы решения нелинейных краевых задач / Ж.Л. Лионс. – М.: Мир, 1972. – 572 с.
117. Фарлоу, С. Уравнения с частными производными / С. Фарлоу. – М.: Мир, 1985. – 384 с.
118. Тихонов, А.Н. Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. – М.: Наука, 1986. – 288 с.
119. Тихонов, А.Н. Нелинейные некорректные задачи / А.Н. Тихонов, А.С. Леонов, А.Г. Ягола. – М.: Наука, 1995. – 320 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

ПРОГРАММА Boer2D.c

Язык программирования C++.

Для компиляции DLL и ее использования в математической среде MathCAD применяется следующий подход:

- 1 В меню компилятора C++5.0 «New» выбирают пункт Win32 DLL.
- 2 В окне «Step 1 of 1» выбирают «An empty DLL project».
- 3 В окне «Workspace -> Heder Files» добавляют файл библиотеки Mcadincl.h
- 4 Создают Source file (Boer2D.c), в рабочую директорию добавляют файл mcaduser.dll и Mspdb60.dll.
- 5 Создают командный файл Compile.bat и запускают его. Рассмотрим текст данного файла:

Файл Compile.bat

```
cl -c -I E:\MATHCAD\USEREF1\MICROSFT\INCLUDE -DWIN32 Boer2D.C
```

6. Компилируют исходный файл Boer2D.c, используя меню «Build -> Compile».
7. Создают командный файл Linkme.bat и запускают его. Рассмотрим текст файла:

Файл Linkme.bat

```
link -out:E:\MATHCAD\USEREF1\Boer2D.dll -dll -entry:"DllEntryPoint"  
Boer2D.obj E:\MATHCAD\USEREF1\MICROSFT\LIB\MCADUSER.LIB
```

В результате выполнения указанных действий в директории userEFI MathCad создается итоговая DLL – Boer2D.dll.
Рассмотрим полный текст программы Boer2D.c [49].

```
/* Boer2D.c,v 1.1 2004/08/30 12:08 */  
/* Programmer: Ishchuk Igor N. */  
/* Revision: 2 $ */  
  
#include "mcadincl.h"  
#include "math.h"  
  
// Обработка ошибок.  
#define INTERRUPTED 1  
#define INSUFFICIENT_MEMORY 2  
#define MUST_BE_SQUARE 3  
#define NUMBER_OF_ERRORS 4  
// Функция ошибок.  
  
char * myErrorMessageTable[NUMBER_OF_ERRORS] =  
{ "interrupted",  
  "insufficient memory",  
  "none data"  
};  
  
/*****  
/* Этот код исполняет функцию Boer2D */  
*****/  
  
// Описание входных данных.  
LRESULT Boer2DProduct( COMPLEXARRAY * const Product,  
const COMPLEXARRAY * const Array1, const COMPLEXARRAY * const  
Array2 )  
{  
/*  
koordinata – сдвиг сетки для определения координаты точки  
контроля температуры;  
N, M – число отсчетов по расстоянию, максимальное значение 100;  
K – число отсчетов по времени, максимальное значение 10000;  
alfa_1, alfa_2 – теплопроводность;  
lambda_1, lambda_2 – теплопроводность;  
K_alfa, K_lambda – линейный коэффициент зависимости  
ТС от температуры;  
h – шаг сетки по расстоянию;  
d – резервная переменная;  
t – шаг сетки по времени;  
Timp – длительность теплового импульса;  
q – тепловой поток через площадь h*h;  
KTS – контактная термическая проводимость;  
beta – постоянная модели;  
x, y, z, k_n, nn, m, i – вспомогательные переменные;  
T[100][100] – массив данных температуры по расстоянию;  
Tk[100][100] – массив данных температуры по времени.  
*/  
long k_n, nn, m, i, koordinata, N, M, K;  
double alfa_1, alfa_2, lambda_1, lambda_2, K_alfa, K_lambda, h, d, t, Timp, q, KTS, beta, x, y, z;
```

```

double T[100][100], Tk[100][100];
    // Проверка первого аргумента.
if ( Array1->rows != 3 )
    return MAKELRESULT( MUST_BE_SQUARE, 1 );
if ( Array1->cols != 2 )
    return MAKELRESULT( MUST_BE_SQUARE, 1 );
    // Проверка второго аргумента.
if ( Array2->rows != 5 )
    return MAKELRESULT( MUST_BE_SQUARE, 2 );
if ( Array2->cols != 2 )
    return MAKELRESULT( MUST_BE_SQUARE, 2 );

    // Задание значений переменным.

alfa_1= Array1->hReal[0][0];
alfa_2= Array1->hReal[0][1];
lambda_1=Array1->hReal[1][0];
lambda_2=Array1->hReal[1][1];
K_alfa=Array1->hReal[0][2];
K_lambda=Array1->hReal[1][2];
N=Array2->hReal[0][0];
K=Array2->hReal[0][1];
h=Array2->hReal[0][2];
d=Array2->hReal[0][3];
t=Array2->hReal[0][4];
M=N;
Timp=Array2->hReal[1][0];
q=Array2->hReal[1][1];
KTS=Array2->hReal[1][2];
koordinata=Array2->hReal[1][3];
beta=Array2->hReal[1][4];

    // Определение формата вывода данных.
if ( koordinata >= 0 )
    MathcadArrayAllocate( Product, (K+1), 2, TRUE , TRUE );
else
    {
    MathcadArrayAllocate( Product, 2*N+1, 2*N+1, TRUE , TRUE );
    }

    // Обнуление значений массива.
for(n_=0;n_<=2*N;n_++)
{
    for(m_=0;m_<=2*M;m_++)
    {
        T[m_][n_]=0;
        Tk[m_][n_]=0;
    }
}

    // Начало расчета температурного поля.
for(k_=0; k_<=K; k_++)
{
    // Функция источника тепла.
    if(k_*t > Timp)
    {
        x=(exp((-1)*(k_*t-Timp)/beta)*q)
        /((T[M][N]*K_lambda+1)*lambda_1+(T[M][N]*K_lambda+1)*lambda_2);
        T[M][N]=T[M][N]+x;
    }
    else
    {
        x=q/((T[M][N]*K_lambda+1)*lambda_1+(T[M][N]*K_lambda+1)*lambda_2);
        T[M][N]=T[M][N]+x;
    }

    // Расчет температурных полей в полупространствах.
    for(i=1;i<=N-1;i++)
    {
        n_=N+i;
        nñ=N-i;
        for(m_=1; m_<=2*M-1; m_++)
        {
            x=(1-4**T[m_][n_]*K_alfa+1)*alfa_1/(h*h))*T[m_][n_];
            y=T[m_+1][n_]*(T[m_+1][n_]*K_alfa+1)*alfa_1+
            T[m_-1][n_]*(T[m_-1][n_]*K_alfa+1)*alfa_1+

```

```

T[m_][n_+1]*(T[m_][n_+1]*K_alfa+1)*alfa_1+
T[m_][n_-1]*(T[m_][n_-1]*K_alfa+1)*alfa_1;
Tk[m_][n_]=x+y*(t/(h*h));
x=(1-4***(T[m_][nn]*K_alfa+1)*alfa_2/(h*h))*T[m_][nn];
y=T[m_+1][nn]*(T[m_+1][nn]*K_alfa+1)*alfa_2+
T[m_-1][nn]*(T[m_-1][nn]*K_alfa+1)*alfa_2+
T[m_][nn+1]*(T[m_][nn+1]*K_alfa+1)*alfa_2+
T[m_][nn-1]*(T[m_][nn-1]*K_alfa+1)*alfa_2;
Tk[m_][nn]=x+y*(t/(h*h));
    }
}
// Расчет температуры в плоскости контакта.
for(m_=1; m_<=2*M-1; m_++)
{
x=2*KTS*h*(Tk[m_][N+1]*K_lambda+1)*lambda_1+
(Tk[m_][N+1]*K_lambda+1)*lambda_2*(Tk[m_][N+1]*K_lambda+1)*lambda_1;
x=x*Tk[m_][N+1];
y=2*KTS*h*(Tk[m_][N-1]*K_lambda+1)*lambda_2+
(Tk[m_][N-1]*K_lambda+1)*lambda_2*(Tk[m_][N-1]*K_lambda+1)*lambda_1;
y=y*Tk[m_][N-1];
z=2*(KTS*h*(Tk[m_][N-1]*K_lambda+1)*lambda_1+
(Tk[m_][N-1]*K_lambda+1)*lambda_2*(Tk[m_][N-1]*K_lambda+1)*lambda_1+
KTS*h*(Tk[m_][N-1]*K_lambda+1)*lambda_2);
Tk[m_][N]=(x+y)/z;
}
if ( koordinata >= 0 )
{
Product->hReal[0][k_] = k_*t;
Product->hReal[1][k_] = Tk[M+koordinata][N];
}
for(n_=0;n_<=2*N;n_++)
{
for(m_=0;m_<=2*M;m_++)
{
Tk[m_][n_]=Tk[m_][n_];
}
}
}
if ( koordinata < 0 )
{
for(m_=0; m_<=2*M; m_++)
{
for(n_=0; n_<=2*N; n_++)
{
Product->hReal[n_][m_] = Tk[m_][n_];
}
}
}
}
// Окончание функции.
return 0;
}
// Заполнение структуры функции.
// Информация, необходимая для регистрации
// функции в Mathcad.
FUNCTIONINFO Boer2D =
{
// Название, которым Mathcad признает функцию.
"Boer2D",
// Параметры, которые нужно использовать.
"M,N",
// Описание функции
(LPCFUNCTION) Boer2DProduct,
// Boer2D (M., N) возвращает множество.
COMPLEX_ARRAY,
// Boer2D (M., N) использует два аргумента.
2,
// Оба аргумента – комплексный массив.
{ COMPLEX_ARRAY, COMPLEX_ARRAY}
};
// Вход в DLL
// Функция _CRT_INIT для компилятора Microsoft 32 бита.
BOOL WINAPI _CRT_INIT(HINSTANCE hinstDLL, DWORD dwReason, LPVOID lpReserved);
BOOL WINAPI DllEntryPoint (HINSTANCE hDLL, DWORD dwReason, LPVOID lpReserved)
{

```

```

switch (dwReason)
{
case DLL_PROCESS_ATTACH:
// DLL прилагает к месту адреса
// текущий процесс.
if (!_CRT_INIT(hDLL, dwReason, lpReserved))
return FALSE;
// Регистрация таблицы сообщений об ошибке.
if ( CreateUserErrorMessageTable(
hDLL, NUMBER_OF_ERRORS, myErrorMessageTable )
// Регистрация пользовательской функции.
CreateUserFunction( hDLL, &Boer2D );
break;
case DLL_THREAD_ATTACH:
case DLL_THREAD_DETACH:
case DLL_PROCESS_DETACH:
if (!_CRT_INIT(hDLL, dwReason, lpReserved))
return FALSE;
break;
}
return TRUE;
}
#endif INTERRUPTED
#endif INSUFFICIENT_MEMORY
#endif MUST_BE_REAL
#endif NUMBER_OF_ERRORS

```

Приложение Б

ПРОГРАММА Boer3D.c

Язык программирования C++. Рассмотрим основную часть текста программы Boer3D.c [49].

```

/* Boer3D.c,v 1.1 2006/09/30 12:08 */
/* Programmer: Ishchuk Igor N. */
/* Revision: 1 $ */

#include "mcaincl.h"
#include "math.h"

// Обработка ошибок.
#define INTERRUPTED 1
#define INSUFFICIENT_MEMORY 2
#define MUST_BE_SQUARE 3
#define NUMBER_OF_ERRORS 3
// Функция ошибок.
char * myErrorMessageTable[NUMBER_OF_ERRORS] =
{ "interrupted",
"insufficient memory",
"none data"
};
float KK(double T, float K1, float K2, float K3, double TFS)
{
float T1,T2;
T1=50;
T2=80;
if (T<=T1)
return(TFS*(1+K1*T));
if (T>T1&&T<=T2 )
return(TFS*(1+T1*(K1-K2)+K2*T));
if (T>T2)
return(TFS*(1+T1*(K1-K2)+T2*(K2-K3)+K3*T));
}
/*****
/* Этот код исполняет функцию Boer3D */
*****/

// Описание входных данных.
LRESULT Boer3DProduct( COMPLEXARRAY * const Product,
const COMPLEXARRAY * const Array1, const COMPLEXARRAY * const Array2 )
{

```



```

/*
koordinata - сдвиг сетки для задания координаты точки
контроля температуры;
N, M, P – число отсчетов по расстоянию, максимальное значение 100;
K – число отсчетов по времени, максимальное значение 10000;
alfa_1, alfa_2, alfa_3 – температуропроводность;
lambda_1, lambda_2 – теплопроводность;
K_alfa, K_lambda – линейный коэффициент зависимости
ТС от температуры;
h – шаг сетки по расстоянию;
d – резервная переменная;
t – шаг сетки по времени;
Timp – длительность теплового импульса;
q – тепловой поток через площадь h*h;
KTS – коэффициент потерь из-за контактной термической проводимости;
beta – постоянная модели;
x, y, z, k_, n_, nn, m_, i – вспомогательные переменные;
T[100][100][100] – массив данных температуры по расстоянию;
Tk[100][100] – массив данных температуры по времени.
*/
long k_, n_, p_, nn_, m_, i, koordinata, N, M, P, K, d;
double alfa_1, alfa_2, alfa_3, lambda_1, lambda_2, lambda_3, KA1, KA2, KA3, KL1, KL2, KL3, h, t, Timp, q, KTS, beta, x, y,

```

z;

```

double T[22][22][22], Tk[22][22][22];
// Задание значений переменным.
alfa_1= Array1->hReal[0][0];
alfa_2= Array1->hReal[1][0];
alfa_3= Array1->hReal[2][0];
lambda_1=Array1->hReal[0][1];
lambda_2=Array1->hReal[1][1];
lambda_3=Array1->hReal[2][1];
KA1=Array1->hReal[0][2];
KA2=Array1->hReal[1][2];
KA3=Array1->hReal[2][2];
KL1=Array1->hReal[0][3];
KL2=Array1->hReal[1][3];
KL3=Array1->hReal[2][3];
N=Array2->hReal[0][0];
K=Array2->hReal[0][1];
h=Array2->hReal[0][2];
d=Array2->hReal[0][3];
t=Array2->hReal[0][4];
M=N;
P=N;
Timp=Array2->hReal[1][0];
q=Array2->hReal[1][1];
KTS=Array2->hReal[1][2];
koordinata=Array2->hReal[1][3];
beta=Array2->hReal[1][4];
// Определение формата вывода данных.
switch( d )
{
case 0:
MathcadArrayAllocate( Product, (K+1), 2, TRUE, TRUE );
break;
case 1 :
MathcadArrayAllocate( Product, 2*N+1, 2*N+1, TRUE, TRUE );
break;
case 2 :
MathcadArrayAllocate( Product, (2*P+1), 2, TRUE, TRUE );
break;
case 3 :
MathcadArrayAllocate( Product, (2*P+1), 2, TRUE, TRUE );
break;
case 4 :
MathcadArrayAllocate( Product, (K+1), 2, TRUE, TRUE );
break;
case 5 :
MathcadArrayAllocate( Product, 2*N+1, 2*N+1, TRUE, TRUE );
break;
}
// Обнуление значений массива.
for(n_=0;n_<=2*N;n_++)
{

```

```

for(m_=0;m_<=2*M;m_++)
{
    for(p_=0;p_<=2*P;p_++)
    {
        if ( isUserInterrupted() )
        {
            MathcadArrayFree( Product );
            return INTERRUPTED;
        }
        T[m_][n_][p_]=0;
        Tk[m_][n_][p_]=0;
    }
}
// Начало расчета температурного поля.
for(k_=0; k_<=K; k_++)
{
    if ( isUserInterrupted() )
    {
        MathcadArrayFree( Product );
        return INTERRUPTED;
    }
// Функция источника тепла.
// 1. Расчет выделения тепла.
for(p_=1;p_<=2*P-1;p_++)
{
    if(k_*t > Timp)
    {
        x=(exp((-1)*(k_*t-Timp)/beta)*q)/(KK(T[M][N][p_],KL1,KL2,KL3,lambda_1)+
        KK(T[M][N][p_],KL1,KL2,KL3,lambda_2));
        T[M][N][p_]=T[M][N][p_]+x;
    }
    else
    {
        x=q/(KK(T[M][N][p_],KL1,KL2,KL3,lambda_1)+KK(T[M][N][p_],KL1,KL2,
        KL3,lambda_2));
        T[M][N][p_]=T[M][N][p_]+x;
    }
}
// 2. Учет перераспределения тепла вдоль нагревателя.
for(p_=1;p_<=2*P-1;p_++)
{
    Tk[M][N][p_]=(1-2**alfa_3/(h*h))*T[M][N][p_]+(t*alfa_3/
    (h*h))*(T[M][N][p_-1]+T[M][N][p_+1]);
}
// Расчет температуры для линии термодатчика.
// 3. Учет КТС для термодатчика
for(p_=1;p_<=2*P-1;p_++)
{
    x=KK(T[M+koordinata][N+1][p_],KL1,KL2,KL3,lambda_1)/(KK(T[M+
    koordinata][N+1]
    [p_],KL1,KL2,KL3,lambda_2)+KK(T[M+koordinata][N+1][p_],KL1,KL2,
    KL3,lambda_1));
    y=KK(T[M+koordinata][N-1][p_],KL1,KL2,KL3,lambda_2)/(KK(T[M+koordinata][N-
    1][p_],KL1,KL2,KL3,lambda_2)+KK(T[M+koordinata][N-1][p_],KL1,KL2,KL3,lambda_1));
    T[M+koordinata][N][p_]=(1-KTS)*(T[M+koordinata][N+1][p_]*x+T[M+koordinata]
    [N-1][p_]*y);
}
// 4. Учет перераспределения тепла вдоль термодатчика.
for(p_=1;p_<=2*P-1;p_++)
{
    Tk[M+koordinata][N][p_]=(1-2**alfa_3/(h*h))*T[M+koordinata][N][p_]+
    (t*alfa_3/(h*h))*(T[M+koordinata][N][p_-1]+T[M+koordinata][N][p_+1]);
}
// 5. Расчет температурных полей в полупространствах.
for(i=1;i<=N-1;i++)
{
    n_=N+i;
    nn_=N-i;
    for(p_=1;p_<=2*P-1;p_++)
    {
        for(m_=1; m_<=2*M-1; m_++)
        {
            x=(1-6**((KK(T[m_][n_][p_],KA1,KA2,KA3,alfa_1))/(h*h))*T[m_][n_][p_];
            y=T[m_+1][n_][p_]*KK(T[m_+1][n_][p_],KA1,KA2,KA3,alfa_1)+

```

```

T[m_][n_][p_]*KK(T[m_][n_][p_],KA1,KA2,KA3,alfa_1)+
T[m_][n_+1][p_]*KK(T[m_][n_+1][p_],KA1,KA2,KA3,alfa_1)+
T[m_][n_-1][p_]*KK(T[m_][n_-1][p_],KA1,KA2,KA3,alfa_1)+
T[m_][n_][p_+1]*KK(T[m_][n_][p_+1],KA1,KA2,KA3,alfa_1)+
T[m_][n_][p_-1]*KK(T[m_][n_][p_-1],KA1,KA2,KA3,alfa_1);
Tk[m_][n_][p_]=x+y*t/(h*h);

x=(1-6*t*(KK(T[m_][nn_][p_],KA1,KA2,KA3,alfa_2))/(h*h))*T[m_][nn_][p_];
y=T[m_+1][nn_][p_]*KK(T[m_+1][nn_][p_],KA1,KA2,KA3,alfa_2)+
T[m_-1][nn_][p_]*KK(T[m_-1][nn_][p_],KA1,KA2,KA3,alfa_2)+
T[m_][nn_+1][p_]*KK(T[m_][nn_+1][p_],KA1,KA2,KA3,alfa_2)+
T[m_][nn_-1][p_]*KK(T[m_][nn_-1][p_],KA1,KA2,KA3,alfa_2)+
T[m_][nn_][p_+1]*KK(T[m_][nn_][p_+1],KA1,KA2,KA3,alfa_2)+
T[m_][nn_][p_-1]*KK(T[m_][nn_][p_-1],KA1,KA2,KA3,alfa_2);
Tk[m_][nn_][p_]=x+y*t/(h*h);
    }
}

// 6. Расчет температуры в плоскости контакта с учетом КТС.
for(p_=1;p_<=2*P-1;p_++)
{
    for(m_=1; m_<=M+koordinata-1; m_++)
    {
        x=KK(Tk[m_][N+1][p_],KL1,KL2,KL3,lambda_1)/(KK(Tk[m_][N+1][p_],
        KL1,KL2,KL3,lambda_2)+KK(Tk[m_][N+1][p_],KL1,KL2,KL3,lambda_1));
        y=KK(Tk[m_][N-1][p_],KL1,KL2,KL3,lambda_2)/(KK(Tk[m_][N-1][p_],
        KL1,KL2,KL3,lambda_2)+KK(Tk[m_][N-1][p_],KL1,KL2,KL3,lambda_1));
        Tk[m_][N][p_]=(1-KTS)*(Tk[m_][N+1][p_]*x+Tk[m_][N-1][p_]*y);
    }
    for(m_=M+koordinata+1; m_<=2*M-1; m_++)
    {
        x=KK(Tk[m_][N+1][p_],KL1,KL2,KL3,lambda_1)/(KK(Tk[m_][N+1][p_],KL1,
        KL2,KL3,lambda_2)+KK(Tk[m_][N+1][p_],KL1,KL2,KL3,lambda_1));
        y=KK(Tk[m_][N-1][p_],KL1,KL2,KL3,lambda_2)/(KK(Tk[m_][N-1][p_],KL1,
        KL2,KL3,lambda_2)+KK(Tk[m_][N-1][p_],KL1,KL2,KL3,lambda_1));
        Tk[m_][N][p_]=(1-KTS)*(Tk[m_][N+1][p_]*x+Tk[m_][N-1][p_]*y);
    }
}

if ( d == 0 ) // возвращает T(t) в точке расположения термодачика (M+koordinata)
{
    Product->hReal[0][k_] = k_*t;
    Product->hReal[1][k_] = Tk[M+koordinata][N][P];
}

if ( d == 4 ) // возвращает T(t) в точке (M-koordinata)
{
    Product->hReal[0][k_] = k_*t;
    Product->hReal[1][k_] = Tk[M-koordinata][N][P];
}

    for(n_=0;n_<=2*N;n_++)
    {
        for(m_=0;m_<=2*M;m_++)
        {
            for(p_=0;p_<=2*P;p_++)
            {
                T[m_][n_][p_]=Tk[m_][n_][p_];
            }
        }
    }
} // конец цикла для K

if ( d == 1 ) // температурное поле в плоскости, перпендикулярной плоскости контакта
{
    for(m_=0; m_<=2*M; m_++)
    {
        for(n_=0; n_<=2*N; n_++)
        {
            Product->hReal[n_][m_] = Tk[m_][n_][P];
        }
    }
}

if ( d == 2 ) // изменение температуры вдоль нагревателя
{
    for(p_=0; p_<=2*P; p_++)
    {
        Product->hReal[0][p_] = h*p_;
    }
}

```

```

Product->hReal[1][p_] = Tk[M][N][p_];
    }
    }
if ( d == 3 ) // изменение температуры вдоль термопары
    {
        for(p_=0; p_<=2*P; p_++)
        {
Product->hReal[0][p_] = h*p_;
Product->hReal[1][p_] = Tk[M+koordinata][N][p_];
        }
    }
if ( d == 5 ) // температурное поле в плоскости контакта
    {
        for(p_=0; p_<=2*P; p_++)
        {
            for(m_=0; m_<=2*M; m_++)
            {
Product->hReal[p_][m_] = Tk[m_][N][p_];
            }
        }
    }
// Окончание функции.
return 0;
}

```

Приложение В

ПРОГРАММА Ident.c

Язык программирования C++. Рассмотрим основную часть текста программы Ident.c [64].

```

/* Ident.c,v 1.1 2004/09/20 21:18 */
/* Programmer: Ishchuk Igor N. */
/* Revision: 1 $ */
#include "mcaincl.h"
#include "math.h"
// Обработка ошибок.
#define INTERRUPTED 1
#define INSUFFICIENT_MEMORY 2
#define MUST_BE_SQUARE 3
#define NUMBER_OF_ERRORS 4
// Функция ошибок.
char * myErrorMessageTable[NUMBER_OF_ERRORS] =
{ "interrupted",
  "insufficient memory",
  "none data"
};
/*****
/* Этот код исполняет функцию Ident */
*****/
// Описание входных данных.
LRESULT IdentProduct( COMPLEXARRAY * const Product,
const COMPLEXARRAY * const Array1, const COMPLEXARRAY * const Array2, const COMPLEXARRAY * const Array3 )
{
long FFLAG;
long k_, n_, nn, m_, i, koordinata, N, M, K, D1, D2, d1_, d2_, Sdvig, Shag;
double alfa, alfa_1, alfa_2, alfa_3, lambda, lambda_1, lambda_2, lambda_3,
K_alfa, K_lambda, h, t, Timp, q, KTS, betta, x, y, z;
double T[100][100], Tk[100][100], Pr[3000];
double delta_1, delta_2, SKO, SKOmin, SKO_alfa_min, alfa_p1, alfa_p2, lambda_min, lambda_p1, lambda_p2, Temper;
alfa_1= Array1->hReal[0][0];
alfa_2= Array1->hReal[0][1];
alfa_3= Array1->hReal[0][3];
alfa=alfa_1;
lambda_1=Array1->hReal[1][0];
lambda_2=Array1->hReal[1][1];
lambda_3=Array1->hReal[1][3];
lambda=lambda_1;
K_alfa=Array1->hReal[0][2];
K_lambda=Array1->hReal[1][2];
D1=Array1->hReal[0][4];
D2=Array1->hReal[1][4];
Sdvig=Array1->hReal[0][5];

```

```

Shag=Array1->hReal[1][5];
N=Array2->hReal[0][0];
K=Array2->hReal[0][1];
h=Array2->hReal[0][2];
SKOmin=Array2->hReal[0][3];
t=Array2->hReal[0][4];
M=N;
Timp=Array2->hReal[1][0];
q=Array2->hReal[1][1];
KTS=Array2->hReal[1][2];
koordinata=Array2->hReal[1][3];
beta=Array2->hReal[1][4];
delta_1= (alfa_3-alfa_1)/D1;
delta_2= (lambda_3-lambda_1)/D2;
SKO=1000;
alfa_p1=alfa_1;
lambda_p1=lambda_1;
alfa_p2=alfa_3;
lambda_p2=lambda_3;
alfa_min=alfa_1;
lambda_min=lambda_1;
FFLAG = 0;
MathcadArrayAllocate( Product, 4, 2, TRUE, TRUE );
for (d1_=0;d1_<=D1;d1_++)
{
for (d2_=0;d2_<=D2;d2_++)
{
if ( isUserInterrupted() )
{
MathcadArrayFree( Product );
return INTERRUPTED;
}
alfa_1= delta_1*d1_+alfa;
lambda_1=delta_2*d2_+lambda;
for(n_=0;n_<=2*N;n_++)
{
for(m_=0;m_<=2*M;m_++)
{
T[m_][n_]=0;
Tk[m_][n_]=0;
}
}
for(k_=0; k_<=K; k_++)
{
if(k_*t > Timp)
{
x=(exp((-1)*(k_*t-Timp)/beta)*q)/ ((T[M][N]*K_lambda+1)*lambda_1+(T[M][N]*K_lambda+1)*lambda_2);
T[M][N]=T[M][N]+x;
}
else
{
x=(q)/((T[M][N]*K_lambda+1)*lambda_1+(T[M][N]*K_lambda+1)*lambda_2);
T[M][N]=T[M][N]+x;
}
for(i=1;i<=N-1;i++)
{
n_=N+i;
nn=N-i;
for(m_=1; m_<=2*M-1; m_++)
{
x=(1-4*t*(T[m_][n_]*K_alfa+1)*alfa_1/(h*h))*T[m_][n_];
y=T[m_+1][n_]*(T[m_+1][n_]*K_alfa+1)*alfa_1+
T[m_-1][n_]*(T[m_-1][n_]*K_alfa+1)*alfa_1+
T[m_][n_+1]*(T[m_][n_+1]*K_alfa+1)*alfa_1+
T[m_][n_-1]*(T[m_][n_-1]*K_alfa+1)*alfa_1;
Tk[m_][n_]=x+y*(t/(h*h));
x=(1-4*t*(T[m_][nn]*K_alfa+1)*alfa_2/(h*h))*T[m_][nn];
y=T[m_+1][nn]*(T[m_+1][nn]*K_alfa+1)*alfa_2+
T[m_-1][nn]*(T[m_-1][nn]*K_alfa+1)*alfa_2+
T[m_][nn+1]*(T[m_][nn+1]*K_alfa+1)*alfa_2+
T[m_][nn-1]*(T[m_][nn-1]*K_alfa+1)*alfa_2;
Tk[m_][nn]=x+y*(t/(h*h));
}
}
}
}
}

```

```

        for(m_=1; m_ <= 2*M-1; m_++)
        {
x=2*KTS*h*(Tk[m_] [N+1]*K_lambda+1)*lambda_1+
(Tk[m_] [N+1]*K_lambda+1)*lambda_2*(Tk[m_] [N+1]*K_lambda+1)*lambda_1;
x=x*Tk[m_] [N+1];
y=2*KTS*h*(Tk[m_] [N-1]*K_lambda+1)*lambda_2+
(Tk[m_] [N-1]*K_lambda+1)*lambda_2*(Tk[m_] [N-1]*K_lambda+1)*lambda_1;
y=y*Tk[m_] [N-1];
z=2*(KTS*h*(Tk[m_] [N-1]*K_lambda+1)*lambda_1+
(Tk[m_] [N-1]*K_lambda+1)*lambda_2*(Tk[m_] [N-1]*K_lambda+1)*lambda_1+
KTS*h*(Tk[m_] [N-1]*K_lambda+1)*lambda_2);
Tk[m_] [N]=(x+y)/z;
        }
        Pr[k_] = Tk[M+koordinata][N];
        for(n_=0; n_ <= 2*N; n_++)
        {
                for(m_=0; m_ <= 2*M; m_++)
                {
                        Tk[m_] [n_] = Tk[m_] [n_];
                }
        }
}
\\ Расчет областей неопределенности идентификации ТС.
SKO_=0;
for(k_=Sdvig; k_ <= K-1; k_ = k_ + Shag)
{
        Temper=Array3->hReal[1][k_];
        SKO_ = SKO_ + ((Pr[k_] - Temper)/Temper)*((Pr[k_] - Temper)/Temper);
}
SKO_ = sqrt(SKO_ / ((K - Sdvig) / Shag));
if (SKO_ < SKOmin)
{
        alfa_p2=alfa_1;
        lambda_p2=lambda_1;
        if (FFLAG == 0)
        {
                alfa_p1=alfa_1;
                lambda_p1=lambda_1;
                FFLAG=1;
        }
}
if (SKO_ < SKO)
{
        alfa_min=alfa_1;
        lambda_min=lambda_1;
        SKO=SKO_;
}
}
}
\\ Передача идентифицированных данных в среду MathCAD.
Product->hReal[0][0] = alfa_p1;
Product->hReal[0][1] = alfa_p2;
Product->hReal[0][2] = alfa_min;
Product->hReal[0][3] = SKO;
Product->hReal[1][0] = lambda_p1;
Product->hReal[1][1] = lambda_p2;
Product->hReal[1][2] = lambda_min;
return 0;
}

```

Приложение Г

ИДЕНТИФИКАЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ Voer3D() НА ОСНОВЕ ВАРИАЦИОННОГО ИСЧИСЛЕНИЯ (Среда моделирования MathCAD 2001)

Г.1. Задание исходных значений параметров модели.

Г.1.1. Постоянные математические модели.

$N := 8$ - число отсчетов по расстоянию по n
 $M := 8$ - число отсчетов по расстоянию по m
 $K := 600$ - число отсчетов по времени
 $h := 0.615 \cdot 10^{-3}$ - шаг сетки по расстоянию
 $t := 0.01$ - шаг сетки по времени
 $T_{imp} := 0.21$ - длительность импульса
 $d := 0$ - управляющая переменная
 $q := 78$ - количество тепла
 $\alpha := 0.05$ - КТС
 $\mu := 3$ - сдвиг координаты точки контроля
 $\beta := 0.095$ - постоянная модели

расстояние до датчика температуры
 $r = 1.85$ мм

$K1a := -0.001$ $K1\lambda := 0.1$
 $K2a := -0.01$ $K2\lambda := 4$
 $K3a := -0.05$ $K3\lambda := 8$

$a2 := 2.92 \cdot 10^{-7}$ $\lambda2 := 0.05$ - КССБ подложка
 $Kof := 7$
 $a5 := 10 \cdot 10^{-7}$ $\lambda5 := 60$

Г.1.2. Задание значений ТС образцовых материалов.

$a1 := 2.9 \cdot 10^{-7}$ $\lambda1 := 0.031$ - Рипор 2М
 $a2 := 2.92 \cdot 10^{-7}$ $\lambda2 := 0.05$ - КССБ- подложка
 $a3 := 4.1 \cdot 10^{-7}$ $\lambda3 := 0.168$ - СКТНФ(цинк)
 $a4 := 2.92 \cdot 10^{-7}$ $\lambda4 := 0.05$ - КССБ

Г.2. Обработка экспериментальных данных.

Г.2.1. Считывание экспериментальных данных.

Данные измерений рипора 2М

$Tf11 := \text{READPRN}(\text{"Ripor\file1.txt"})$
 $Tf12 := \text{READPRN}(\text{"Ripor\file2.txt"})$
 $Tf13 := \text{READPRN}(\text{"Ripor\file3.txt"})$
 $Tf14 := \text{READPRN}(\text{"Ripor\file4.txt"})$
 $Tf15 := \text{READPRN}(\text{"Ripor\file5.txt"})$

 $Tf16 := \text{READPRN}(\text{"Ripor\file6.txt"})$
 $Tf17 := \text{READPRN}(\text{"Ripor\file7.txt"})$
 $Tf18 := \text{READPRN}(\text{"Ripor\file8.txt"})$
 $Tf19 := \text{READPRN}(\text{"Ripor\file9.txt"})$
 $Tf10 := \text{READPRN}(\text{"Ripor\file10.txt"})$
 $Tf1 := \frac{(Tf11 + Tf12 + Tf13 + Tf14 + Tf15 + Tf16 + Tf17 + Tf18 + Tf19 + Tf10)}{10}$

Данные измерений СКТНФ

$Tf21 := \text{READPRN}(\text{"Cink\file1.txt"})$
 $Tf22 := \text{READPRN}(\text{"Cink\file2.txt"})$
 $Tf23 := \text{READPRN}(\text{"Cink\file3.txt"})$
 $Tf24 := \text{READPRN}(\text{"Cink\file4.txt"})$
 $Tf25 := \text{READPRN}(\text{"Cink\file5.txt"})$

 $Tf26 := \text{READPRN}(\text{"Cink\file6.txt"})$
 $Tf27 := \text{READPRN}(\text{"Cink\file7.txt"})$
 $Tf28 := \text{READPRN}(\text{"Cink\file8.txt"})$
 $Tf29 := \text{READPRN}(\text{"Cink\file9.txt"})$
 $Tf20 := \text{READPRN}(\text{"Cink\file10.txt"})$

$Tf2 := \frac{(Tf21 + Tf22 + Tf23 + Tf24 + Tf25 + Tf26 + Tf27 + Tf28 + Tf29 + Tf20)}{10}$

Г.2.2. Замена экспериментальных точек сплайн интерполированной функцией.

r := rows(Tf1) - 1
Time1 := submatrix(Tf1, 0, r, 0, 0)

T1 := $\frac{\text{submatrix}(Tf1, 0, r, 1, 1)}{\text{Kof}}$

Splain1 := cspline(Time1, T1)
Tint_1(τ) := interp(Splain1, Time1, T1, τ)

Tr_1 := F $\Delta\tau := \text{Time1}_2 - \text{Time1}_1$
rr := rows(Tr_1) - 1

Time2 := submatrix(Tr_1, 0, rr, 0, 0)

T_1 := submatrix(Tr_1, 0, rr, 1, 1)

T2 := $\frac{\text{submatrix}(Tf2, 0, r, 1, 1)}{\text{Kof}}$

Splain2 := cspline(Time1, T2)
Tint_2(τ) := interp(Splain2, Time1, T2, τ)

Данные измерений

Данные измерений КССБ

Tf31 := READPRN("KSSB\file1.txt")

Tf32 := READPRN("KSSB\file2.txt")

Tf33 := READPRN("KSSB\file3.txt")

Tf34 := READPRN("KSSB\file4.txt")

Tf35 := READPRN("KSSB\file5.txt")

Tf36 := READPRN("KSSB\file6.txt")

Tf37 := READPRN("KSSB\file7.txt")

Tf38 := READPRN("KSSB\file8.txt")

Tf39 := READPRN("KSSB\file9.txt")

Tf30 := READPRN("KSSB\file10.txt")

Tf3 := $\frac{\text{Tf31} + \text{Tf32} + \text{Tf33} + \text{Tf34} + \text{Tf35} + \text{Tf36} + \text{Tf37} + \text{Tf38} + \text{Tf39} + \text{Tf30}}{10}$

$$T3 := \frac{\text{submatrix}(Tf3, 0, r, 1, 1)}{Kof}$$

$$\text{Splain3} := \text{cspline}(\text{Time1}, T3)$$

$$\text{Tint}_3(\tau) := \text{interp}(\text{Splain3}, \text{Time1}, T3, \tau)$$

$$\text{Mem_T1} := \begin{cases} \text{for } i \in 0..r \\ v_i \leftarrow \text{Tint}_1(i \cdot \Delta\tau) \\ v \end{cases}$$

$$\text{Mem_T1}_7 := 0.8 \cdot \text{Mem_T1}_8$$

$$\text{Mem_T1}_6 := 0.75 \cdot \text{Mem_T1}_7$$

$$\text{Mem_T1}_5 := 0.7 \cdot \text{Mem_T1}_6$$

$$\text{Mem_T1}_4 := 0.6 \cdot \text{Mem_T1}_5$$

$$\text{Mem_T1}_3 := 0.4 \cdot \text{Mem_T1}_4$$

$$\text{Mem_T1}_2 := 0 \quad \text{Mem_T1}_1 := 0 \quad \text{Mem_T1}_0 := 0$$

$$\text{Mem_T2}_7 := 0.8 \cdot \text{Mem_T2}_8$$

$$\text{Mem_T2}_6 := 0.75 \cdot \text{Mem_T2}_7$$

$$\text{Mem_T2}_5 := 0.7 \cdot \text{Mem_T2}_6$$

$$\text{Mem_T2}_4 := 0.6 \cdot \text{Mem_T2}_5$$

$$\text{Mem_T2}_3 := 0.4 \cdot \text{Mem_T2}_4$$

$$\text{Mem_T2}_2 := 0 \quad \text{Mem_T2}_1 := 0 \quad \text{Mem_T2}_0 := 0$$

$$\text{Splain1} := \text{cspline}(\text{Time1}, \text{Mem_T1})$$

$$\text{Tint}_1(\tau) := \text{interp}(\text{Splain1}, \text{Time1}, \text{Mem_T1}, \tau)$$

$$\text{Splain2} := \text{cspline}(\text{Time1}, \text{Mem_T2})$$

$$\text{Tint}_2(\tau) := \text{interp}(\text{Splain2}, \text{Time1}, \text{Mem_T2}, \tau)$$

$$\text{Mem_T3} := \begin{cases} \text{for } i \in 0..r \\ v_i \leftarrow \text{Tint}_3(i \cdot \Delta\tau) \\ v \end{cases}$$

$$\text{Mem_T3}_7 := 0.8 \cdot \text{Mem_T3}_8$$

$$\text{Mem_T3}_6 := 0.75 \cdot \text{Mem_T3}_7$$

$$\text{Mem_T3}_5 := 0.7 \cdot \text{Mem_T3}_6$$

$$\text{Mem_T3}_4 := 0.6 \cdot \text{Mem_T3}_5$$

$$\text{Mem_T3}_3 := 0.4 \cdot \text{Mem_T3}_4$$

$$\text{Mem_T3}_2 := 0 \quad \text{Mem_T3}_1 := 0 \quad \text{Mem_T3}_0 := 0$$

$$\text{Splain3} := \text{cspline}(\text{Time1}, \text{Mem_T3})$$

$$\text{Tint}_3(\tau) := \text{interp}(\text{Splain3}, \text{Time1}, \text{Mem_T3}, \tau)$$

Г.2.3. Скорректированные данные измерений.

$$\begin{array}{l}
 \text{Hot1} := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0..K-1 \\ \quad v_{i,1} \leftarrow \text{Tint}_1(i \cdot t) \\ \quad v_{i,0} \leftarrow i \cdot t \\ v \end{array} \right. \quad
 \text{Hot2} := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0..K-1 \\ \quad v_{i,1} \leftarrow \text{Tint}_2(i \cdot t) \\ \quad v_{i,0} \leftarrow i \cdot t \\ v \end{array} \right. \quad
 \text{Hot3} := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0..K-1 \\ \quad v_{i,1} \leftarrow \text{Tint}_3(i \cdot t) \\ \quad v_{i,0} \leftarrow i \cdot t \\ v \end{array} \right.
 \end{array}$$

$$\text{Hot1}^T = \begin{array}{c|cccccc} & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ \hline 0 & 0 & 0.01 & 0.02 & 0.03 & 0.04 & 0.05 & 0.06 \\ 1 & 0 & 5.575 \cdot 10^{-3} & 9.756 \cdot 10^{-3} & 0.013 & 0.014 & 0.015 & 0.015 \end{array}$$

$$\text{Hot2}^T = \begin{array}{c|cccccc} & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ \hline 0 & 0 & 0.01 & 0.02 & 0.03 & 0.04 & 0.05 & 0.06 \\ 1 & 0 & 3.998 \cdot 10^{-3} & 6.996 \cdot 10^{-3} & 9.082 \cdot 10^{-3} & 0.01 & 0.011 & 0.011 \end{array}$$

$$\text{Hot3}^T = \begin{array}{c|cccccc} & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ \hline 0 & 0 & 0.01 & 0.02 & 0.03 & 0.04 & 0.05 & 0.06 \\ 1 & 0 & 4.571 \cdot 10^{-3} & 7.999 \cdot 10^{-3} & 0.01 & 0.012 & 0.012 & 0.012 \end{array}$$

Г.2.4. Поиск момента максимума температуры.

$$\begin{array}{l}
 \text{Max1} := \left| \begin{array}{l} i \leftarrow 0 \\ \text{Vmax} \leftarrow \max[(\text{Hot1})^{(i)}] \\ \text{while } \text{Hot1}_{i,1} - \text{Vmax} \neq 0 \\ \quad i \leftarrow i + 1 \\ i \end{array} \right. \quad
 \text{Max2} := \left| \begin{array}{l} i \leftarrow 0 \\ \text{Vmax} \leftarrow \max[(\text{Hot2})^{(i)}] \\ \text{while } \text{Hot2}_{i,1} - \text{Vmax} \neq 0 \\ \quad i \leftarrow i + 1 \\ i \end{array} \right. \quad
 \text{Max3} := \left| \begin{array}{l} i \leftarrow 0 \\ \text{Vmax} \leftarrow \max[(\text{Hot3})^{(i)}] \\ \text{while } \text{Hot3}_{i,1} - \text{Vmax} \neq 0 \\ \quad i \leftarrow i + 1 \\ i \end{array} \right.
 \end{array}$$

$$\text{Max1} = 317 \quad \text{Max2} = 252 \quad \text{Max3} = 313$$

$$\max[(\text{Hot1})^{(i)}] = 4.027 \quad \max[(\text{Hot2})^{(i)}] = 2.304 \quad \max[(\text{Hot3})^{(i)}] = 3.495$$

Г.3. Расчет оптимальных значений параметров модели методом сопряженных градиентов.

q := 78 β := 0.095 α := 0.05 P1 := 0.0767 P2 := 1 P3 := 0.4768 γ := 1 δ := 0.09 Ξ := 10¹⁰

$$\begin{aligned}
 \text{SKO}(q, \beta, \alpha) := & \text{TT} \leftarrow \text{Boer3D} \left(\begin{array}{ccc} a1 & a2 & a5 \\ \lambda1 & \lambda2 & \lambda5 \\ K1a \cdot 10^{-3} & K2a \cdot 10^{-3} & K3a \cdot 10^{-3} \\ K1\lambda \cdot 10^{-3} & K2\lambda \cdot 10^{-3} & K3\lambda \cdot 10^{-3} \end{array} \right) \cdot \begin{pmatrix} N & \text{Timp} \\ K & q \\ h & \alpha \\ d & 3 \\ t & \beta \end{pmatrix} \\
 \Theta \leftarrow & \frac{|\text{Hot1}_{\text{Max}1,1} - \text{TT}_{\text{Max}1,1}|}{\text{Hot1}_{\text{Max}1,1}} \\
 J1 \leftarrow & \text{if } \Theta > \delta, \Xi \cdot \Theta, P1 \cdot \frac{\sum_{i=10}^{\text{Max}1-200} (\text{Hot1}_{i10,1} - \text{TT}_{i10,1})^2}{\frac{\text{Max}1-300}{10} - 1} \\
 J2 \leftarrow & \text{if } \Theta > \delta, \Xi \cdot \Theta, P2 \cdot \frac{\sum_{i=\text{Max}1-200}^{\text{Max}1+100} (\text{Hot1}_{i10,1} - \text{TT}_{i10,1})^2}{\frac{300}{10} - 1} \\
 J3 \leftarrow & \text{if } \Theta > \delta, \Xi \cdot \Theta, P3 \cdot \frac{\sum_{i=\frac{\text{Max}1+100}{10}}^{\frac{K}{10}-1} (\text{Hot1}_{i10,1} - \text{TT}_{i10,1})^2}{\frac{K}{10} - \frac{\text{Max}1+100}{10} - 1} \\
 t_{\text{max}} \leftarrow & 0 \\
 \text{Vmax} \leftarrow & \max(\text{TT}) \\
 \text{while } & \text{TT}_{t_{\text{max}},1} - \text{Vmax} \neq 0 \\
 & t_{\text{max}} \leftarrow t_{\text{max}} + 1 \\
 J_1 \leftarrow & \frac{J1 + J2 + J3}{P1 + P2 + P3} + \gamma \cdot \left[\frac{(t_{\text{max}} - \text{Max}1)^2}{100} \right] \\
 \text{TT} \leftarrow & \text{Boer3D} \left(\begin{array}{ccc} a3 & a2 & a5 \\ \lambda3 & \lambda2 & \lambda5 \\ K1a \cdot 10^{-3} & K2a \cdot 10^{-3} & K3a \cdot 10^{-3} \\ K1\lambda \cdot 10^{-3} & K2\lambda \cdot 10^{-3} & K3\lambda \cdot 10^{-3} \end{array} \right) \cdot \begin{pmatrix} N & \text{Timp} \\ K & q \\ h & \alpha \\ d & 3 \\ t & \beta \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

```

Θ ←  $\frac{|\text{Hot2}_{\text{Max2},1} - \text{TT}_{\text{Max2},1}|}{\text{Hot2}_{\text{Max2},1}}$ 
J1 ← if  $\left[ \Theta > \delta, \Xi \cdot \Theta, P1 \cdot \frac{\frac{(\text{Max2}-200)}{10} \sum_{i=10}^{10} (\text{Hot2}_{i10,1} - \text{TT}_{i10,1})^2}{(\text{Max2}-300) - 1}} \right]$ 
J2 ← if  $\left[ \Theta > \delta, \Xi \cdot \Theta, P2 \cdot \frac{\frac{(\text{Max2}+100)}{10} \sum_{i=\frac{(\text{Max2}-200)}{10}}^{10} (\text{Hot2}_{i10,1} - \text{TT}_{i10,1})^2}{\frac{300}{10} - 1}} \right]$ 
J3 ← if  $\left[ \Theta > \delta, \Xi \cdot \Theta, P3 \cdot \frac{\frac{K}{10} - 1 \sum_{i=\frac{(\text{Max2}+100)}{10}}^{10} (\text{Hot2}_{i10,1} - \text{TT}_{i10,1})^2}{\frac{K}{10} - \frac{(\text{Max2}+100)}{10} - 1}} \right]$ 
t_max ← 0
Vmax ← max(1)[TT]
while TTt_max,1 - Vmax ≠ 0
  t_max ← t_max + 1
  J_2 ←  $\frac{J1 + J2 + J3}{P1 + P2 + P3} + \gamma \cdot \left[ \frac{(t_{\text{max}} - \text{Max2})^2}{100} \right]$ 
  TT ← Boer3D  $\begin{pmatrix} a4 & a2 & a5 \\ \lambda4 & \lambda2 & \lambda5 \\ K1a \cdot 10^{-3} & K2a \cdot 10^{-3} & K3a \cdot 10^{-3} \\ K1\lambda \cdot 10^{-3} & K2\lambda \cdot 10^{-3} & K3\lambda \cdot 10^{-3} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} N & \text{Timp} \\ K & q \\ h & \alpha \\ d & 3 \\ t & \beta \end{pmatrix}$ 
  Θ ←  $\frac{|\text{Hot3}_{\text{Max3},1} - \text{TT}_{\text{Max3},1}|}{\text{Hot3}_{\text{Max3},1}}$ 
  J1 ← if  $\left[ \Theta > \delta, \Xi \cdot \Theta, P1 \cdot \frac{\frac{(\text{Max3}-200)}{10} \sum_{i=10}^{10} (\text{Hot3}_{i10,1} - \text{TT}_{i10,1})^2}{(\text{Max3}-300) - 1}} \right]$ 
1

```

$$\begin{aligned}
 J_2 &\leftarrow \text{if } \Theta > \delta, \Xi \cdot \Theta, P_2 \cdot \frac{\sum_{i=\frac{(\text{Max}3-200)}{10}}^{\frac{(\text{Max}3+100)}{10}} (\text{Hot}_{3,i,1} - \text{TT}_{i,1})^2}{\frac{300}{10} - 1} \\
 J_3 &\leftarrow \text{if } \Theta > \delta, \Xi \cdot \Theta, P_3 \cdot \frac{\sum_{i=\frac{(\text{Max}3+100)}{10}}^{\frac{K}{10}-1} (\text{Hot}_{3,i,1} - \text{TT}_{i,1})^2}{\frac{K}{10} - \frac{(\text{Max}3+100)}{10} - 1} \\
 t_{\max} &\leftarrow 0 \\
 V_{\max} &\leftarrow \max(\text{TT})^{(1)} \\
 \text{while } \text{TT}_{t_{\max},1} - V_{\max} \neq 0 \\
 t_{\max} &\leftarrow t_{\max} + 1 \\
 J_{_3} &\leftarrow \frac{J_1 + J_2 + J_3}{P_1 + P_2 + P_3} + \gamma \cdot \left[\frac{(t_{\max} - \text{Max}3)}{100} \right]^2 \\
 J &\leftarrow \frac{J_{_1} + J_{_2} + J_{_3}}{3} \\
 J &
 \end{aligned}$$

Given

$$65.1 < q < 85.1$$

$$0.075 < \beta < 0.105$$

$$0.01 < \alpha < 0.11$$

$$\text{TC} := \text{Minimize}(\text{SKO}, q, \beta, \alpha)$$

– количество тепла;
– постоянная модели;
– коэффициент тепловых потерь

во тепла;
ая модели;
мент тепловых потерь

Приложение Д

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ НЕКОТОРЫХ МАТЕРИАЛОВ

Материал	λ_1 при 25 °С				a_1 при 25 °С			
	Эталонное значение, Вт · м ⁻¹ · К ⁻¹	Среднее значение, Вт · м ⁻¹ · К ⁻¹	Относительная погрешность		Эталонное значение × 10 ⁻⁷ , м ² · с ⁻¹	Среднее значение × 10 ⁻⁷ , м ² · с ⁻¹	Относительная погрешность	
			Систематическая, %	Случайная, %			Систематическая, %	Случайная, %
ППУ	0,031	0,0300	3,2	6,1	2,9	2,835	2,2	6,8
КССБ	0,050	0,0486	2,8	3,5	2,92	2,879	1,4	3,4
ТИМ	0,058	0,0584	0,7	4,4	2,8	2,795	0,2	4,5
ТИМ-0	0,058	0,0574	1,0	4,2	2,9	2,901	0,1	6,2
СКТНФ(Ц)	0,168	0,1708	1,7	2,6	4,1	4,135	0,1	2,8
СКТНФ(С)	0,192	0,1921	0,1	2,8	4,2	4,130	1,7	3,1

Принятые сокращения для материалов: ППУ – пенополиуретан; КССБ – кремнеземное связующее бетонит; ТИМ – теплоизоляционный материал; СКТНФ(Ц) – синтетический каучук термостойкий низкомолекулярный, форма цинк; СКТНФ(С) – синтетический каучук термостойкий низкомолекулярный, форма серебро.

ПРОГРАММА RHL.c

Язык программирования C++. Рассмотрим основную часть текста программы RHL.c.

```

/* RHL.c,v 1.1 2008/03/18 22:01 */
/* Programmer: Ishchuk Igor N. */
/* Revision: 1 $ */
#include "mccadincl.h"
#include "math.h"
// Обработка ошибок.
#define INTERRUPTED 1
#define INSUFFICIENT_MEMORY 2
#define MUST_BE_SQUARE 3
#define NUMBER_OF_ERRORS 3
// Функция ошибок.
char * myErrorMessageTable[NUMBER_OF_ERRORS] =
{
    "interrupted",
    "insufficient memory",
    "none data"
};

float Kof(double T, float Kkto, double kto)
{
    return(kto*(1+Kkto*T));
};

float KK2(double T, float K, double TFS)
{
    return(TFS*(1+K*T));
};

float KK(double T, float K1, float K2, float K3, double TFS)
{
    float T1,T2;
    T1=20;
    T2=40;
    if (T<=T1)
        return(TFS*(1+K1*T));
    if (T>T1&&T<=T2)
        return(TFS*(1+T1*(K1-K2)+K2*T));
    if (T>T2)
        return(TFS*(1+T1*(K1-K2)+T2*(K2-K3)+K3*T));
};
/*****
/* Этот код исполняет функцию RHL */
*****/
// Описание входных данных.
LRESULT RHLProduct( COMPLEXARRAY * const Product, const COMPLEXARRAY * const Array1, const COMPLEXARRAY *
const Array2 )
{
/*
    mu1 – координата начала цели по оси n=0..N;
    mu2 – координата конца цели, mu2>mu1;
    N – число отсчетов по расстоянию, максимальное значение 1000;
    K – число отсчетов по времени, максимальное значение 10000;
    alfa_1, alfa_2 – температуропроводность;
    lambda_1, lambda_2 – теплопроводность;
    KA(1..3), KL(1..3) – коэффициенты финитной функции ТС от температуры;
    kto – коэффициент теплового обмена;
    Kkto – коэффициент нелинейности теплового обмена;
    h – шаг сетки по расстоянию;
    t – шаг сетки по времени;
    Timp1 – время начала подачи теплового импульса;
    Timp2 – время окончания теплового воздействия;
    E – энергия излучения;
    R – коэффициент контактных тепловых потерь;
    u – управление выводом данных;
    betta1, betta2 – постоянные модели;
    x, y, z, k_, n_, pp, m_, i – вспомогательные переменные;
    T[1000], Tk[1000] – массивы данных температуры по расстоянию;
*/
long k_, n_, i, mu1, mu2, N, M, P, K, u1, u2;
double alfa_1, alfa_2, E, lambda_1, lambda_2, ksi, KA1, KA2, KA3, KL1, R, KL2, KL3, h, t, Timp1, Timp2, betta1, betta2, x, y, z, c,
kto, Kkto, KA, KL;
double T[1000], Tk[1000];

```

```

// Задание значений переменных.
alfa_1=Array1->hReal[0][0];
alfa_2=Array1->hReal[1][0];
KA=Array1->hReal[2][0];
kto=Array1->hReal[3][0];

lambda_1=Array1->hReal[0][1];
lambda_2=Array1->hReal[1][1];
KL=Array1->hReal[2][1];
Kkto=Array1->hReal[3][1];
KA1=Array1->hReal[0][2];
KA2=Array1->hReal[1][2];
KA3=Array1->hReal[2][2];
E=Array1->hReal[3][2];
KL1=Array1->hReal[0][3];
KL2=Array1->hReal[1][3];
KL3=Array1->hReal[2][3];
R=Array1->hReal[3][3];
Timp1=Array2->hReal[0][0];
beta1=Array2->hReal[1][0];
mu1=Array2->hReal[2][0];
Timp2=Array2->hReal[0][1];
beta2=Array2->hReal[1][1];
mu2=Array2->hReal[2][1];
N=Array2->hReal[0][2];
h=Array2->hReal[1][2];
u1=Array2->hReal[2][2];
K=Array2->hReal[0][3];
t=Array2->hReal[1][3];
u2=Array2->hReal[2][3];
// Определение формата вывода данных.
switch( u1 )
{
case 0:
MathcadArrayAllocate( Product, (K+1), 2, TRUE , TRUE );
break;
case 1:
MathcadArrayAllocate( Product, (N+1), 2, TRUE , TRUE );
break;
}
// Обновление значений массива.
for(n_=0;n_<=N;n_++)
{
if ( isUserInterrupted() )
{
MathcadArrayFree( Product );
return INTERRUPTED;
}
T[n_]=0;
Tk[n_]=0;
}
// Начало расчета температурного поля.
for(k_=0; k_<=K; k_++)
{
if ( isUserInterrupted() )
{
MathcadArrayFree( Product );
return INTERRUPTED;
}
// Расчет граничных условий.
// 1-. ГУ III и II родов.
if(k_*t >= Timp1)
{
z=1;
x=2*t*KK(T[0],KA1,KA2,KA3,alfa_1)/(h*KK(T[0],KA1,KA2,KA3,lambda_1));
y=KK((T[0]+T[1])/2,KL1,KL2,KL3,lambda_1);
Tk[0]=(1-x*Kof(T[0],Kkto,kto))*T[0]-x*y*(T[0]-T[1])/h;
if(k_*t <= Timp2)
{
Tk[0]=Tk[0]+2*t*z*((1-exp((-1)*(k_*t)/beta1))*E-pow(T[0],4)*5.67032*pow(10,-8))*
KK(T[0],KA1,KA2,KA3,alfa_1)/(KK(T[0],KL1,KL2,KL3,lambda_1)*h);
}
else
{
Tk[0]=Tk[0]+2*t*z*(exp((-1)*(k_*t-Timp2+Timp1)/beta2)*E-pow(T[0],4)*5.67032*

```

```

8))*KK(T[0],KA1,KA2,KA3,alfa_1)/(KK(T[0],KL1,KL2,KL3,lambda_1)*h);
}
}
// Расчет температурного поля.
for(n_=1;n_<=N-1;n_++)
{
x=(1-2*t*(KK(T[n_],KA1,KA2,KA3,alfa_1))/(h*h))*T[n_];
y=T[n_+1]*KK(T[n_+1],KA1,KA2,KA3,alfa_1)+
T[n_-1]*KK(T[n_-1],KA1,KA2,KA3,alfa_1);
Tk[n_]=x+y*t/(h*h);
}
// Уточнение температурного поля с учетом дефекта.
if ( u2 == 0 )
{
for(n_=mu1+1;n_<=mu2-1;n_++)
{
x=(1-2*t*(KK2(T[n_],KA,alfa_2))/(h*h))*T[n_];
y=T[n_+1]*KK2(T[n_+1],KA,alfa_2)+
T[n_-1]*KK2(T[n_-1],KA,alfa_2);
Tk[n_]=x+y*t/(h*h);
}
// Точка (mu1).
x=(KK(Tk[mu1-1],KL,KL2,KL3,lambda_1)+KK2(Tk[mu1],KL,lambda_2))/2;
y=(KK2(Tk[mu1],KL,lambda_2)+KK2(Tk[mu1+1],KL,lambda_2))/2;
Tk[mu1]=R*(x*Tk[mu1-1]+y*Tk[mu1+1])/(x+y);
// Точка (mu2).
x=(KK(Tk[mu2+1],KL,KL2,KL3,lambda_1)+KK2(Tk[mu2],KL,lambda_2))/2;
y=(KK2(Tk[mu2],KL,lambda_2)+KK2(Tk[mu2-1],KL,lambda_2))/2;
Tk[mu2]=R*(x*Tk[mu2+1]+y*Tk[mu2-1])/(x+y);
}
if ( u1 == 0 ) // возвращает T(t).
{
Product->hReal[0][k_] = k_*t;
Product->hReal[1][k_] = Tk[0];
}
for(n_=0;n_<=N;n_++)
{
T[n_]=Tk[n_];
}
} // конец цикла для K
if ( u1 == 1 ) // температурное поле вдоль линии координат.
{
for(n_=0; n_<=N; n_++)
{
Product->hReal[0][n_] = n_*h;
Product->hReal[1][n_] = Tk[n_];
}
}
} // окончание функции.
return 0;
}

```


**ПРОГРАММНОЕ И АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
СРЕДСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ
ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ «ФАКТОР-5»**

Интерфейс программного обеспечения

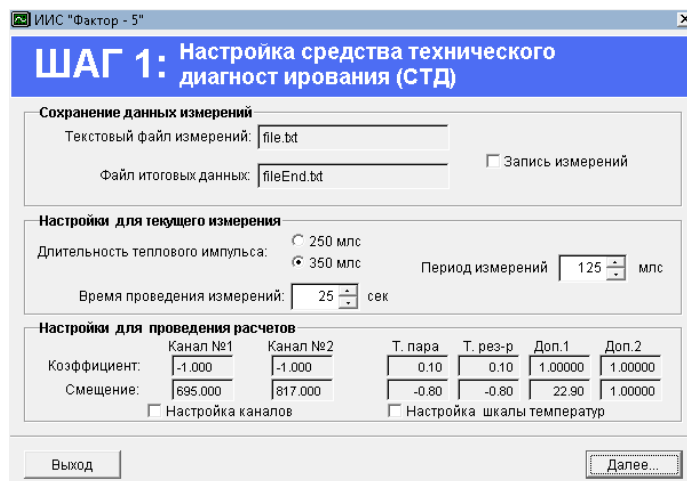


Рис. Ж.1. Шаг 1



Рис. Ж.2. Шаг 2



Рис. Ж.3. Шаг 3



Рис. Ж.4. Шаг 4

Порядок работы измерительного зонда и платы адаптера

Принципиальная схема зонда представлена на рис. Ж.5. В состав зонда входит операционный усилитель (M_1), терморезистор (R), термопара (T_n), а также ключ (M_2), обеспечивающий подключение источника тепла к цепи питания для выделения теплоты в заданном интервале времени или светодиода (M_3) для контроля работоспособности зонда.

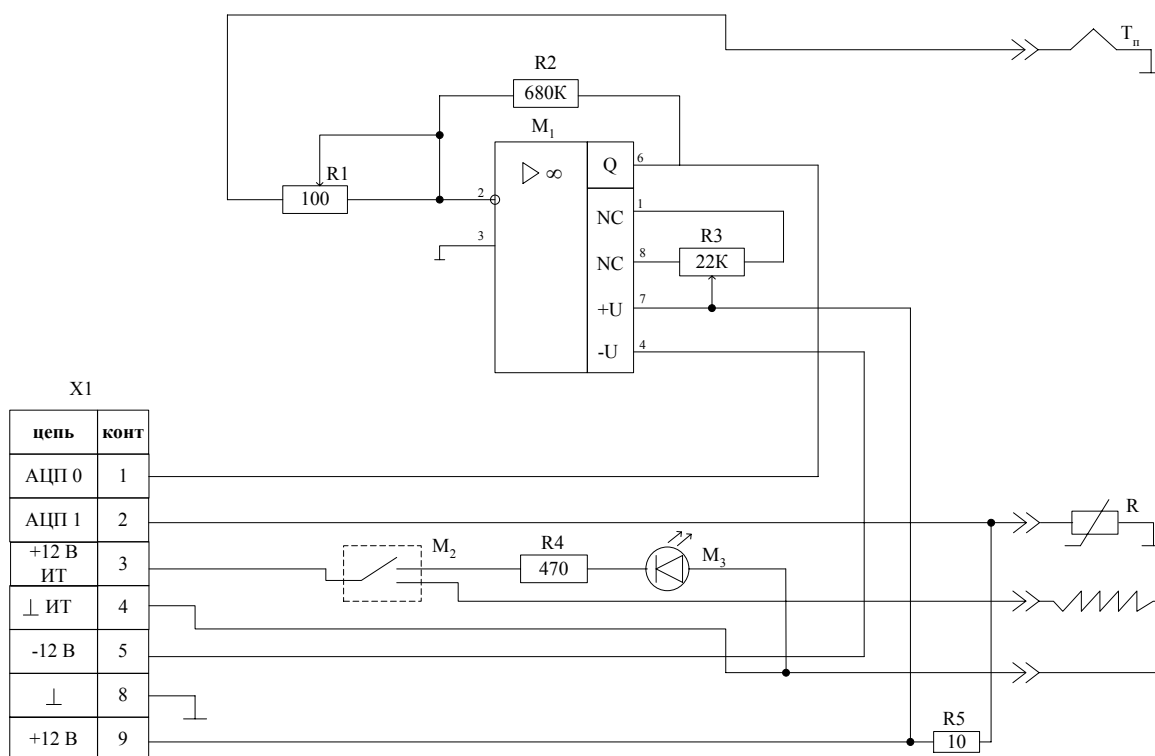


Рис. Ж.5. Принципиальная схема зонда

Измерительный зонд работает в режиме измерений, подачи теплового импульса и контроля.

В режиме измерений сигнал от термопары, холодные спаи которой расположены на материале с большой теплоемкостью (медь), поступает на инверсный вход операционного усилителя, который обеспечивает усиление термоЭДС термопары в 6800 раз, при этом коэффициент усиления рассчитывается на основании выражения

$$K = -\frac{R_2}{R_1}.$$

Подстроечный резистор R_3 предназначен для установки «нуля» усилителя M_1 с целью увеличения рабочего диапазона.

С выхода M_1 сигнал поступает на контакт 1 разъема $X1$, а на контакт 2 напряжение с плеча R делителя R и R_5 .

Для подачи теплового импульса во втором режиме работы зонда ключ переводится в положение включения нагревателя.

В режиме контроля работоспособности зонда (контроль подачи теплового импульса) ток течет от БП ПК через контакт 3 разъема $X1$, ключ и через согласующий нагрузочный резистор R_4 поступает на светодиод (M_3), включение которого показывает совместную работу адаптера и зонда при подаче теплового импульса.

Принципиальная схема адаптера (рис. Ж.6) состоит из мультиплексора (M₉), операционного усилителя (M₇), АЦП (M₆), трех регистров (M₁), селектора адреса, состоящего из дешифратора (M₄) и компаратора кодов (M₅), двух линий задержки, выполненных на одновибраторах (M₈), и оптронного ключа (Op).

Адаптер может находиться в следующих программно задаваемых режимах:

- чтение данных из каналов измерений;
- подача теплового импульса путем записи команды управления в регистр.

В режиме чтения данных осуществляются следующие операции, задающие состояние адаптера и параметры режима измерений:

1. Запись управляющего слова в регистр адаптера (порт 0x31C:=129), где число 129 обозначает код нулевого напряжения, считываемого с АЦП. Считанный адрес с ША через схему управления формирует сигнал, поступающий от компаратора M₅ на АЦП M₆. После того, как поступил сигнал «Запуск» на вход 11 АЦП, время преобразования аналогового сигнала в цифровой составляет не более 55 мс. На выходах 1 – 9, 18 выставляется десятиразрядный код преобразованного сигнала, поступившего с выхода повторителя напряжения и реализованного на операционном усилителе M₇. В программе драйвера обмена данными с адаптером в этот момент реализуется программная задержка длительностью 60 мс.

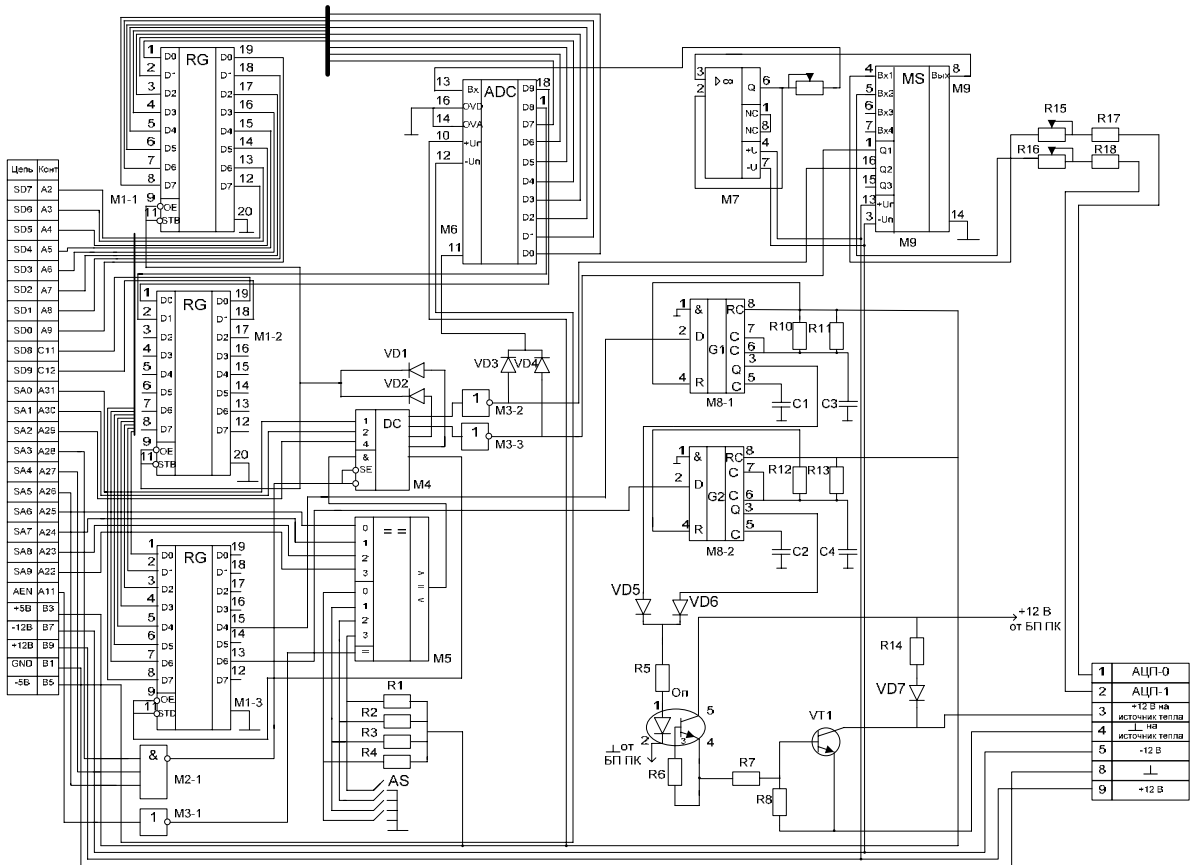


Рис. Ж.6. Принципиальная схема адаптера

2. Для считывания кода данных с выхода АЦП производится операция считывания слова с порта 0x31C. В результате поступления данного адреса на ША БУ генерирует сигнал управления, поступающий на входы OE и STB регистров M₁, через которые десятиразрядный код данных поступает на ШД ISA канала.

3. Подключение канала выходного напряжения АЦП-0, АЦП-1 выполняется мультиплексором M₉. Так подключение канала АЦП-0 осуществляется записью в порт 0x31C числа 129, а для подключения канала АЦП-1 число 129 записывается в порт 0x131C. В первом случае управляющий сигнал с выхода M₄ через M₃₋₂ и VD1 поступает на АЦП и одновременно на вход Q₂ M₉. Во втором случае сигнал через M₃₋₃ и VD2 аналогичным образом поступает на АЦП и на вход Q₁ M₉.

В режиме подачи теплового импульса осуществляются следующие операции:

1. Запись управляющего слова в порт 0x31E:=255. Число 255 в двоичной системе счисления представляется в виде 1111111. Данное число записывается в регистр M₁₋₃, на выходах 12 – 19 которого выставляется напряжение логической единицы. Для подачи импульса длительностью 250 мс в данный порт через 10 мс записывается управляющее слово 0x31E:=191. В двоичной системе счисления 191 представляется в виде 10111111. В результате на выходе 13 регистра напряжение логической единицы сменяется напряжением логического нуля, которое поступает на вход 2 одновибратора M₈₋₂ и запускает его. На выходе 3 данного одновибратора генерируется импульс длительностью 211±0,1 мс, который поступает через VD6 на Op, обеспечивающий подачу тока от БП ПК с максимальным током нагрузки до 7,3 А на нагревательный элемент.

2. Для подачи теплового импульса длительностью 350 мс в порт 0x31E записывается число 239, которое в двоичной системе счисления имеет вид 11101111. На выходе 15 M₁₋₃ напряжение логической единицы сменяется напряжением логического нуля, которое поступает на вход 2 M₈₋₁ и запускает его. Аналогично предыдущему случаю на выходе 3 данного одновибратора генерируется импульс длительностью 344±0,1 мс, который поступает через VD5 на оптронный ключ.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОВЫХ МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ (ОБЪЕКТОВ)	7
1.1. Общие принципы разработки математического обеспечения	7
1.2. Методы обнаружения дефектов (объектов) на основе термографии	12
1.3. Методика обработки изображений в инфракрасном диапазоне волн на основе идентификации тепловых свойств скрытых подповерхностных объектов	16
2. ДИСКРЕТНЫЕ МОДЕЛИ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ С РАЗРЫВНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ И ВНУТРЕННИМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛА	31
2.1. Двумерная нелинейная задача для изотропной среды ...	31
2.2. Алгоритм численного решения двумерной модели	33
2.3. Практические расчеты по двумерной модели и экспериментальные данные	36
2.4. Трехмерная нелинейная задача для изотропной среды ...	39
2.5. Алгоритм численного решения трехмерной модели	40
2.6. Практические расчеты по трехмерной модели и экспериментальные данные	43
3. ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ С РАЗРЫВНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ И ВНУТРЕННИМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛА	47
3.1. Определение тепловых свойств на основе многофакторных функций преобразования в обратных задачах	47
3.2. Решение коэффициентной обратной задачи методом параметрической оптимизации	52
3.3. Экспериментальные исследования идентификации тепловых свойств на основе решения двумерной модели	57
3.4. Задача идентификации параметров трехмерной дискретной модели в вариационной постановке	60
3.5. Оценка устойчивости решений	65
4. ДИСКРЕТНЫЕ МОДЕЛИ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПРИ НАГРЕВЕ ТЕПЛОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ	69
4.1. Дискретная модель трехмерной нелинейной задачи для изотропной среды	69
4.2. Экспериментальные исследования и численное моделирование	74
4.3. Алгоритм численного решения методом фиктивных областей	78
5. ИДЕНТИФИКАЦИЯ СВОЙСТВ СКРЫТЫХ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО ИХ ТЕПЛОВОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ	82
5.1. Метод и алгоритм идентификации тепловых свойств скрытых подповерхностных объектов	82

5.2. Модель поиска скрытых подповерхностных объектов в инфракрасном диапазоне волн	89
5.3. Методика поиска скрытых подповерхностных объектов в грунте в инфракрасном диапазоне волн	93
6. ПРИБОРЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СКРЫТЫХ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ОБЪЕКТОВ	97
6.1. Общие принципы разработки программного обеспечения	97
6.2. Программное и аппаратное обеспечение средства технического диагностирования теплоизоляционных материалов	99
6.3. Специализированные устройства обработки данных	102
6.4. Экспериментальная оптико-электронная система идентификации свойств скрытых подповерхностных объектов	119
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	134
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	136
Приложение А. Программа Boer2D.c	145
Приложение Б. Программа Boer3D.c	151
Приложение В. Программа Ident.c	158
Приложение Г. Идентификация коэффициентов математической модели Boer3D() на основе вариационного исчисления	162
Приложение Д. Результаты экспериментального определения тепловых свойств некоторых материалов	169
Приложение Е. Программа RHL.c	170
Приложение Ж. Программное и аппаратное обеспечение средства технического диагностирования теплоизоляционных материалов «Фактор-5»	175