



ТЕПЛОМЕТРИЯ
В СЕЛЬСКОМ
ХОЗЯЙСТВЕ

Б.Х. ДРАГАНОВ, С.А. САЖИНА,
Ю.М. СЕРГИЕНКО, В.Г. ФЕДОРОВ

ТЕПЛОМЕТРИЯ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Под редакцией профессора
Б. Х. Драганова



Киев
Издательство УСХА
1993

УДК 563.3:621.1.0164

Рецензент доктор технічних наук, професор
С. П. Рудобашта

Теплометрия у сільському господарстві / Б.Х. Драганов, С.О. Сажина, Ю.М. Сергієнко, В.Г. Федоров. – К.: Вид-во УСГА, 1993. – 280 с.

ISBN 5-7987-0144-1

У монографії приведено загальні відомості про контактну та безконтактну теплометрію сільськогосподарських процесів. Викладено теорії теплометрії, технології виготовлення теплометричної апаратури та основи їх метрологічного забезпечення. Описано прилади та апаратура для визначення теплофізичних характеристик сільгосппродуктів і тепломасометрії зернопродуктів, об'єктів / тварин, рослин / сільськогосподарських енергоустановок.

Призначена для науковців, інженерно-технічного персоналу, технологів, зоотехників і студентів сільськогосподарських та технологічних вузів.

Табл. 11. Іл. 140. Бібліогр.: 80 назв.

В монографии приводятся общие сведения о контактной и бесконтактной теплометрии сельскохозяйственных процессов. Изложены теории теплометрии, технологии изготовления теплометричной аппаратуры и основы метрологического обеспечения. Описаны приборы и аппаратура для определения теплофизических характеристик сельхозпродуктов и тепломассометрии зернопродуктов, объектов / животных, растений / сельскохозяйственных энергоустановок.

Предназначена для научных работников, инженерно-технического персонала, технологов, зоотехников и студентов сельскохозяйственных и технологических вузов.

Табл. 11. Ил. 140. Библиогр.: 80 назв.

Т 2203030000 - 053 Без об'яви
227 - 93

ISBN 5-7987-0144-1 © Б.Х. Драганов, С.О. Сажина, Ю.М. Сергієнко, В.Г. Федоров, 1993

ПРЕДИСЛОВИЕ

По энергозатратам сельскохозяйственное производство стоит в первых рядах отраслей народного хозяйства нашей страны. Энергетические и экологические проблемы, возникающие как при выращивании растений и животных, так и при хранении и переработке сельскохозяйственной продукции, диктуют необходимость резкого снижения этих затрат. При проведении большинства технологических процессов трудно определить, сколько энергии на них затрачивается. Это объясняется тем, что если термометрия – наука об измерении качественного показателя процесса переноса теплоты – является одной из наиболее древних отраслей метрологии, то теплотметрия начала активно развиваться лишь в последние несколько десятков лет.

Предметом этой новой науки является измерение плотности теплового потока, передаваемого какому-либо объекту (грунту, растению, животному, продукту) или отводимого от него за счет теплопроводности, конвекции, лучеиспускания либо несколькими способами одновременно. Развитие теплотметрии связано с созданием миниатюрных малоинерционных тепломеров, которые позволяют проводить измерения без искажения основного технологического процесса.

В настоящее время теплотметрические методы применяются в самых разных отраслях народного хозяйства – от медицины до космоса. Сельскохозяйственные технологические процессы имеют много специфических черт, одна из которых состоит в том, что перенос теплоты в них сопровождается переносом вещества (в основном воды) за счет диффузии, испарения или конденсации. Поэтому необходимо создавать тепломеры, которые не препятствуют перемещению влаги, а также позволяют измерить интенсивность переноса теплоты вместе с этим потоком.

Важным применением теплотрических методов является разработка способов определения эффективных теплофизических характеристик грунтов, продуктов, ограждений и других объектов непосредственно в рабочих условиях либо максимально к ним приближенных. Информация об этих характеристиках необходима для расчета любого технологического процесса.

В книге нашел отражение опыт авторов по созданию и совершенствованию теплотрической аппаратуры, а также по применению ее для изучения различных сельскохозяйственных объектов и процессов.

Книга написана для научных работников, а также для инженерно-технического персонала сельскохозяйственных и перерабатывающих отраслей. Она может быть полезна студентам старших курсов сельскохозяйственных и пищевых вузов.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТЕПЛОМЕТРИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

1.1. Плотность потоков теплоты в процессах сельскохозяйственного производства

В любой отрасли сельскохозяйственного производства основную роль играют тепловые процессы, т.е. процессы переноса и накопления тепловой энергии. Известно, что практически вся жизнедеятельность на Земле, в том числе и производство продуктов питания, имеет своим источником лучистую энергию Солнца. Лишь около пяти процентов этой энергии, попадающей на поверхность листа растения, расходуется непосредственно на фотосинтез, остальная часть превращается в теплоту. Что же касается солнечной энергии, падающей на грунт или на сельскохозяйственных животных, то она целиком переходит в теплоту. За счет этой теплоты прогреваются почва, растения и животные, что оказывает существенное влияние на физиологические процессы роста.

Тепловой баланс зеленого листа довольно сложен. Находясь под действием солнечной радиации, лист может иметь температуру на несколько градусов выше, чем окружающий воздух. При этом теплота переходит от листа к воздуху и окружающим предметам за счет конвекции, лучеиспускания и так называемой транспирации – вместе с потоком испаряющейся через устьица листа влаги. В тени лист может иметь температуру более низкую чем воздух, при этом за счет конвекции, лучеиспускания от окружающих предметов и конденсации на поверхности (образование росы) лист получает теплоту. Продукты фотосинтеза, приводящие к росту листа, а также удаляемые из него, еще сильнее усложняют тепловые процессы.

Не менее сложны тепловые процессы при выращивании животных. Взаимодействие с окружающей средой также может происходить за счет конвекции, лучеиспускания и испарения. Очень важную роль здесь играют, как и в растениеводстве, процессы внутреннего

теплопереноса. Кроме конвекции (в основном с кровью у теплокровных животных), теплота переносится теплопроводностью через различные ткани.

Первичная обработка и хранение сельскохозяйственной продукции также сопровождаются сложными тепловыми процессами. К продолжающимся, хотя и затухающим явлениям жизнедеятельности растительных и животных тканей добавляются процессы направленного теплового (нагрев, сушка) или холодильного (охлаждение, замораживание) воздействия. При этом появляется необходимость учитывать перенос теплоты в элементах оборудования, используемого для обработки продукции, в тепловой изоляции этого оборудования и камер хранения. В обычно применяемых в сельскохозяйственном производстве теплоизоляционных материалах процессы переноса теплоты есть результат теплопроводности, конвекции, лучеиспускания, испарения и конденсации. Их интенсивность оказывает большое влияние на качество продукции и энергетические затраты на ее обработку и хранение.

Наконец, при промышленной и кулинарной переработке сельскохозяйственной продукции тепловыделения вызываемые жизнедеятельностью, прекращаются, однако важность и сложность тепловых процессов не снижается. Их интенсивность чаще всего определяет производительность технологического оборудования и связанные с нею металлоемкость, энергозатраты и другие показатели. То же касается и сельскохозяйственных энергетических установок.

Подсчитано, что большинство процессов выращивания и обработки сельскохозяйственной продукции по своей интенсивности значительно превышает процессы, происходящие в недрах Солнца. Кажущийся парадокс объясняется тем, что при этих расчетах определяли интенсивность процессов переноса энергии на единицу массы вещества. Огромная масса Солнца приводит к высокой концентрации энергии, позволяющей проходить в его недрах термоядерным реакциям.

Этот пример подтверждает необходимость различать качественные и количественные показатели тепловых явлений. Основной качественный показатель —

это температура. Она характеризует уровень, на котором происходит перенос энергии. С количественной стороны эти явления выражаются через различные виды плотности теплового потока.

Тепловой поток Q — это количество теплоты, проходящее в единицу времени через произвольную поверхность. Он имеет те же единицы измерения, что и мощность, поэтому иногда называется тепловой мощностью. Той же буквой Q обозначают и количество теплоты в джоулях, однако путаницы при этом не возникает, поскольку тепловой поток обычно рассчитывают, когда процессы переноса стационарные или близки к ним (т.е. время не является основной характеристикой). Если же процесс нестационарный и важно время его проведения, то рассчитывают количество теплоты, проведенной или отведенной от данного объекта.

Тепловой поток может быть отнесен к единице объема, массы, длины, но наибольшее значение в практических расчетах имеет тепловой поток, отнесенный к единице поверхности, через которую он проходит

$$q = QA^{-1}, \quad (1.1.)$$

где A — площадь поверхности, через которую проходит тепловой поток Q .

Величина q называется плотностью теплового потока ($\text{Вт}/\text{м}^2$). Различают местную (локальную) и среднюю на поверхности A плотности теплового потока.

Связь между ними устанавливается соотношением

$$q = 1/A \int_A q_{\text{лок}} dA, \text{ где } q_{\text{лок}} \text{ и } q - \text{соответственно}$$

местная и средняя на поверхности A плотности теплового потока.

Тепловой поток и плотность его могут быть выражены как в векторной, так и в скалярной формах. Под векторной плотностью теплового потока понимают вектор, проекция которого на произвольное направление есть местная плотность теплового потока, проходящего через площадку, перпендикулярную к выбранному направлению.

Поскольку теплота переносится различными способами, то соответствующую плотность теплового потока $2^x - 1500\text{к}$

ка q сопровождаются тем или иным индексом: q_T - теплопроводность; q_K - конвекция, q_L - лучеиспускание. Как видно из изложенного выше, в большинстве отраслей сельскохозяйственного производства теплоперенос сопровождается массопереносом. Если происходят фазовые превращения вещества (плавление, затвердевание, парообразование или конденсация), то массоперенос однозначно связан с переносом теплоты:

$$j = m A^{-1} t^{-1} = q_M \cdot r^{-1} \quad (1.2)$$

В этих формулах $m t^{-1}$ - количество вещества, прошедшего фазовое превращение в единицу времени, кг/с; A - поверхность раздела фаз, m^2 (совпадает с поверхностью, через которую переходит теплота); r - теплота фазового перехода, Дж/кг; j - плотность потока массы, кг/ m^2 с; t - время процесса.

Интенсивность переноса теплоты за счет фазовых превращений бывает соизмеримой с другими способами переноса теплоты, поэтому ее целесообразно выделить и обозначить q_M . В этом случае образуется возможность измерять одними и теми же теплотметрическими средствами не только плотность потока теплоты, но и плотность потока массы [64], т.е. определять две основные характеристики теплопереноса большинства рабочих процессов сельскохозяйственных производств.

В отличие от Q плотность теплового потока q необходимо определять как для стационарных, так и для нестационарных процессов. Если одновременно актуальны два или несколько способов переноса теплоты, это можно учитывать сложением индексов, например q_{L+K} .

Значение информации о плотности теплового потока и его компонентов - а ее получение и является основной задачей теплотметрии - рассмотрим для основных групп процессов сельскохозяйственного производства, приводя при этом примерный уровень этих потоков.

Известно, что плотность лучистого потока, идущего к нам от Солнца, зависит от широты местности, времени суток и года, угла падения потока на поверхность листа или почвы, облачности и т.п. Для средней полосы страны значение этой величины обычно не превышает 1000 Вт/м^2 , минимальная величина днем даже в пасмурную погоду – около 10 Вт/м^2 . Конвективные, транспирационные и лучистые потоки теплоты между листом и окружающей средой идут на уровне $5...50 \text{ Вт/м}^2$. В растениеводстве очень важное значение имеют тепловые потоки в грунте (за счет облучения Солнцем, потока энергии из недр Земли, таяния льда и т.д.). Они передаются теплопроводностью, конвекцией, лучеиспусканием, с потоком массы (воды или водного пара) и в сумме имеют порядок $10^0...10^2 \text{ Вт/м}^2$.

Иметь информацию об этих величинах необходимо на всех этапах опытного и производственного выращивания любых растений, хотя обычно в качестве основного фактора, определяющего урожайность, используют облученность участка. Приборы для измерения этой величины – радиометры, актинометры, альбедометры – известны давно [14] и по существу являются одними из первых теплотметрических устройств. Развитие теплотметрии здесь связано с созданием фитотронов – установок для выращивания растений в строго контролируемых и регулируемых условиях подвода теплоты, влаги, питательных веществ, регулируемой атмосферы. Одной из важных задач, которые решаются с помощью фитотронов, является определение теплового баланса растения, т.е. всех статей прихода и расхода теплоты [31].

Отметим, что в пределах одного и того же участка и даже одного листа растения могут быть различны как суммарные плотности тепловых потоков, так и пропорции между их компонентами. Так известно, что массообменный компонент теплового потока на облученной поверхности листа значительно меньше, чем на теневой. Кроме того, все эти величины могут существенно меняться во времени. Поэтому к теплотметрической аппаратуре, которую необходимо внедрять для

изучения и управления рабочими процессами в растениеводстве, можно предъявить основные требования – возможность раздельного определения лучистой, конвективной, кондуктивной и массообменной составляющей теплового потока на уровне $10^0 \dots 10^3 \text{ Вт/м}^2$ (эти измерения должны проводиться локально во времени и пространстве).

Плотность тепловых потоков при выращивании сельскохозяйственных животных на порядок выше, чем при выращивании растений. Неравномерность их в пространстве еще более ярко выражена в связи с очень большими отличиями в способности животных тканей пропускать через себя или накапливать теплоту, с различиями в покрове поверхности животного.

Уровень теплового потока может меняться не только в зависимости от способа содержания, рациона кормления, времени суток, но и от стрессового или болезненного состояния животного или птицы. Зная номинальное значение плотности теплового потока для данных условий, по его изменению можно судить о степени утомленности или о заболевании животного.

Вообще говоря, методы теплотрии должны способствовать развитию системного подхода к сельскохозяйственному производству. Очень важно установить качественные и количественные связи, например, между энергетическими затратами на выращивание корма для животных, транспортировку и предубойное их содержание, холодильную обработку, хранение и промышленную или кулинарную переработку продукции. Поэтому решение проблемы тепломассопереноса при этом весьма актуально.

Для перерабатывающих отраслей эти вопросы являются более простыми и изученными. Информация о плотности теплового потока и его компонентов здесь необходима для проведения технологических расчетов, управления и совершенствования процессов и аппаратов. Рассмотрим две основные группы теплообменных аппаратов. В первой группе обрабатываемый продукт обменивается энергией с теплоносителем (хладоносителем) через разделяющую стенку аппарата или другую твердую стенку, во второй – соприкасается

ся с ним непосредственно либо через эластичную пленку. Аппараты первой группы относятся к поверхностным теплообменникам и называются рекуперативными теплообменными аппаратами. К поверхностным относятся также регенеративные теплообменники, в которых стенка аппарата поочередно соприкасается с теплоносителем и продуктом. Аппараты второй группы можно назвать контактными.

Средняя плотность теплового потока q (тепловая нагрузка) является важнейшей характеристикой поверхностного теплообменного аппарата.

Предложение Е.Ф. Адиутори [17] представлять q как произведение двух величин, одна из которых является функцией только Δt , а другая - всех остальных параметров процесса, не является принципиально новой методикой, поскольку лишь переносит отдельные зависимости из одной функции в другую. В некоторых случаях этот прием может принести пользу, упрощая обработку опытных данных и расчеты процессов, но широкого распространения он не получит, поскольку выпадает из общей схемы представления количественного показателя переноса субстанции (тепла, вещества, электричества и т.д.) как частного от деления движущей силы процесса на сопротивление переносу.

Для поверхностных аппаратов зачастую плотность потока массы между двумя фазами вещества (массовая нагрузка, массовое напряжение поверхности нагрева) j характеризует их производительность. В особенности это касается выпарных аппаратов - если их производительность считать по испаренной влаге, то $m = j$. Хотя j при этом связана с q простым соотношением $q = j \cdot r$ или $q = j \Delta i$, каждая из этих характеристик (q и j) влияет на компоненты R_i термического сопротивления теплопередаче $\sum R_i = \Delta t q^{-1} (j - \text{на интенсивность образования накипи, } q - \text{на теплоотдачу при кипении и конденсации})$, поэтому придется вести варианты расчеты, например по методу нагрузочных характеристик [45].

Кроме среднего значения плотности теплового потока, для поверхностных аппаратов зачастую очень

важна информация о локальной во времени и по поверхности нагрева плотности теплового потока. Естественно, изменение q во времени имеет особое значение для аппаратов периодического действия. Сошлемся на работу В.Д. Попова [45], где он приводит опытные данные по вакуум-аппаратам периодического действия и указывает, что поскольку q меняется за цикл варки в 3...10 раз, нельзя рекомендовать ее простое арифметическое усреднение в расчетных методиках, иными словами, нужна информация о функции $q(\tau)$. Можно продолжить этот пример для вакуум-аппаратов непрерывного действия, тогда эта функция должна превратиться в функцию пути продукта или поверхности нагрева $q(A)$. Если воспользоваться зависимостями $q(\tau)$ по [45], то получим, что расчет средней q по среднему логарифмическому температурному напору Δt может привести к большим ошибкам. По существу, такая картина должна наблюдаться в любых аппаратах, где происходят частичные фазовые переходы и изменения температуры продукта.

Не менее важна информация о локальном значении q для аппаратов непрерывного действия, в которых теплоноситель (или продукт) может проходить неодинаковый путь; примерами таких аппаратов могут служить кожуховые, рубашечные, оросительные теплообменники. Понятно, что несовершенные гидравлические расчеты этих аппаратов не могут обеспечить конструкторам возможность проектировать их с одинаковыми скоростями движения жидкости – следовательно интенсивность теплоотдачи получается тоже разная.

Для регенеративных аппаратов важно знать изменение q в пространстве и времени: это вытекает самого принципа их работы в нестационарном режиме, поскольку с поверхностью нагрева по очереди соприкасаются теплоноситель и продукт.

Для аппаратов второй группы функций $q(\tau)$ и $q(A)$ обычно еще реже обозначены, чем для повесных аппаратов, и много чаще теплообмен осложнен массообменом. Кроме того, контактные аппараты зачастую имеют поверхностные элементы, т.е. изложенные выше вопросы сохраняют свое значение и

здесь. В качестве примера таких аппаратов можно привести печи для подового хлеба: сверху подвод тепла идет лучисто-контактным способом, а снизу — через поверхность пода. Можно привести и обратный пример: для открытого аппарата рубашечного типа важна информация о тепломассообмене с поверхности продукта, контактирующей с окружающей средой.

Методы теплотрии в большой мере применяются для исследования и совершенствования самых разнообразных аппаратов контактной обработки, и мы не раз будем к ним обращаться. Здесь же покажем необходимость информации о плотности потоков тепла и массы в связи с проблемой уменьшения усушки сельскохозяйственных продуктов в процессе их обработки и хранения. Эта проблема имеет две стороны — сохранение количества и качества продукта, поскольку одновременно с уменьшением массы может происходить ухудшение качества. Хотя в основном усушка или естественная убыль продукта происходит за счет испарения влаги, что само по себе не приводит к уменьшению питательных веществ, но одновременно окисляются жиры, разлагаются другие ценные вещества. Вопрос об ухудшении качества в процессе усушки не решен, а для плодов и овощей мнения противоречивы. Так, в [66] указывается, что поскольку продукты растительного происхождения имеют много влаги, небольшая потеря ее почти не отразится на их качестве. Более аргументированным выглядит мнение А.А. Колесника [28] — уже небольшие потери влаги, выражающиеся в снижении тургора, приводят к нарушению биологических процессов, усилению распада органических веществ, ослаблению устойчивости к микроорганизмам.

Вместе с тем многие отечественные и зарубежные исследователи этой проблемы согласны — усушку на современном этапе развития пищевой технологии надо уменьшать. Общим является и мнение, четко высказанное Г.Б. Чижовым [66]: "... При поверхностном испарении массоперенос связан с теплопереносом, а совокупность этих явлений следует рассматривать как единое целое". Добавим, что и исследовать эту совокупность целесообразно с помощью

единого инструмента – тепломера, который в данном случае можно назвать темпломассомером.

Остановимся лишь на вопросах, связанных с необходимостью измерения локальных потоков тепла и массы. Локальность в пространстве, выраженная функциями $q(x, y, z)$ и $j(x, y, z)$, актуальна по крайней мере в трех аспектах. Это, во-первых, потребность в информации о q и j на поверхности продукта, контактирующей с теплоносителем. Функции $q(A)$ и $j(A)$ особенно выражены при термической (холодильной) обработке крупногабаритных мясопродуктов, например говяжьих полутуш. Большая неравномерность величин q и j объясняется двумя причинами: разной толщиной отдельных частей полутуши и разной способностью пропускать тепло и влагу компонентов этих частей (мышцы, жир, кости). Вместе с тем, чтобы создать оптимальную технологию охлаждения полутуш, нужно, например, за счет разной скорости обдува или разной доли лучистого теплообмена обеспечить равномерное распределение q и j по всей поверхности продукта.

Далее, если продукты обрабатываются или хранятся в слое или штабеле, то важно знать величины q и j в разных точках по толщине штабеля. Если продукты уложены более чем в два ряда, то внутри слоя начинает происходить саморегулирование процессов теплообмена и величина j уменьшается. Равномерность усушки по слоям штабеля при вентилировании его воздухом свидетельствовала бы при наличии такой информации о том, что режим вентилирования близок к оптимальному, а равномерность величины q также о том, что нет местных очагов самосогревания. Естественно, что информация о q и j помогла бы выбрать размеры штабеля (кагата) и параметры воздуха, а также частоту включения вентиляторов.

Наконец, может случиться, что в стремлении интенсифицировать теплообмен при снижении массообмена будет выработан такой режим обработки продукта, что это требование окажется выполненным, но при следующем хранении суммарная усушка останется прежней. Здесь речь о переменном потоке массы по

толщине самого продукта – вначале может подсохнуть поверхностный слой, а глубинные – значительно позже. Известно, что в продуктах растительного происхождения влага диффундирует легче, чем, например, в мясе, но вопрос о соотношении условий миграции влаги в продукте и ее поверхностного испарения заслуживает более полного исследования.

В непосредственной связи с проблемой усушки пищевых продуктов находятся вопросы измерения и уменьшения плотности теплового потока через ограждения камер, в которых производится их обработка или хранение. К настоящему времени все исследователи этой проблемы признают большое влияние теплопритоков на усушку, но количественной информации о q в обширном экспериментальном материале практически нет. Косвенно это влияние можно проследить по так называемому парадоксу Д.Г. Рютова. В его опытах абсолютная усушка мороженого мяса не изменялась от степени загрузки камеры и составляла около 5 т в год при загрузке 100, 160 или 260 т мяса [64]. В.З. Жадан [23] получил упрощенную форму связи между q через ограждения (точнее, теплопритоками к воздуху, контактирующему с продуктами) и усушкой продуктов, которая объясняет этот странный на первый взгляд факт: тепло, воспринимаемое от ограждений, расходуется на испарение влаги при контакте воздуха с продуктом, независимо от количества продукта.

Важно знать и локальные теплопритоки в связи с разработкой мероприятий по снижению подвода тепла к воздуху, в особенности на его пути от охлаждающих приборов к продукту. Упомянем и о хорошо известном влиянии массообмена на перенос тепла в ограждениях: при достижении точки росы внутри теплоизоляции выпадает влага, что приводит к резкому возрастанию потоков тепла. Мероприятия по гидроизоляции ограждений не всегда эффективны, и в этих случаях очень нужно средство для выявления мест проникновения влаги в изоляцию и ее накопления, т.е. средство для измерения локальных потоков тепла и влаги.

1.2. Производные тепломассообменные характеристики

Плотность потоков тепла q и массы j — это первичные тепло-массообменные характеристики, количественная мера переноса. Вторичными (либо производными) характеристиками будем называть величины связывающие q и j с движущей силой процесса: перепадом температур, концентраций, давлений, а также с градиентом, изменением температуры и т.п. Таким образом, к производным тепло-массообменным характеристикам относятся коэффициенты тепло- и массоотдачи, теплопроводности и диффузии, теплоемкости и энтальпии и некоторые другие.

Значение этих характеристик для практических расчетов рассмотрим в соответствии с принятым в теории сушки делением тепловых процессов на процессы внешнего тепло-массообмена и внутреннего тепло-массообмена. Такое деление удачно подчеркивает специфику явлений, происходящих на границе между растением, животным, продуктом и теплоносителем или стенкой, либо внутри этих объектов, поэтому эти термины целесообразно распространить и на другие виды сельскохозяйственных процессов.

Растительные и животные ткани, сырье и продукты пищевых производств являются типичными термолабильными веществами. Это значит, что связь между режими параметрами (перепад температуры, приращение и т.п.) и количественными показателями переноса (плотность потоков тепла и массы, количество теплоты или вещества) очень сложна и непостоянна. Следовательно, для экспериментального определения любой производной тепло-массообменной характеристики нужно иметь возможность измерять плотности потоков тепла и массы локально в пространстве и времени.

Коэффициент теплоотдачи $\alpha \equiv q (\Delta t)^{-1}$ до сих пор остается основной характеристикой интенсивности внешнего теплообмена и широко применяется в практических расчетах несмотря на то, что для большинства процессов сельскохозяйственных и пищевых производств ярко выражены функции $\alpha(\Delta t)$ или $\alpha(q)$. Подчеркнем, что Δt здесь

означает разность температур между поверхностью растения, животного, отдельных тканей или продуктов и омывающей жидкой (либо газообразной) средой — теплоносителем. Поэтому называть отношение $q/\Delta t$ в данном случае коэффициентом теплопередачи, как это делают в некоторых книгах [31], нецелесообразно. Возможно, что по мере внедрения тепломеров и накопления экспериментальной информации о функции $q(\Delta t)$ будет найден более удачный расчетный прием, но на основании многолетнего опыта можно утверждать, что отказ от использования α , как это сделано в работе [1], нецелесообразен.

Все, что в 1.1 говорилось о необходимости измерения при конвективном теплообмене, относится и к α , поэтому здесь остановимся на вопросах, связанных с измерением перепада температур Δt . Первый вопрос касается погрешностей измерения температур поверхности ткани, продукта или стенки и жидкости (газа). Особенно сложно измерить температуру поверхности тонких листьев различных растений в естественных условиях и в солнечные часы. Даже при слабом ветре температура поверхности листа очень лабильна, тогда как в защищенном грунте этот показатель более стабилен [31]. Эти погрешности усугубляются тем, что параметры омывающей поверхность жидкости зачастую переменны, а введение в эту жидкость термометрических зондов нарушает гидродинамическую и тепловую картину. Второй вопрос относится к неопределенности места замера температуры жидкости. Обычные рекомендации измерять ее за пределами теплового пограничного слоя либо каким-то образом усреднять становятся для продуктов и теплоносителей сельскохозяйственных производств весьма расплывчатыми. Поэтому нам кажется перспективной разработкой метода определения α без измерения Δt .

Если теплообмен осложнен массообменом за счет поверхностного испарения, то коэффициент массообмена (массоотдачи) $\beta \equiv j(\Delta p)^{-1}$ можно считать наиболее удачной формой аналога коэффициенту теплоотдачи α . И здесь так же, как для α , возникают дополнительные трудности при определении перепада давлений водяных

З-1500к

паров Δp у поверхности продукта и в окружающей среде. Поэтому актуальна разработка способа определения β без измерения Δp .

При измерении интенсивности массообмена с поверхности растений, животных или продукта в контактных аппаратах возникают также специфические осложнения, которым нет аналогов в теплообмене. Дело в том, что формулы $j = \beta \Delta p$ и $\Delta m = jA$ строго описывают массообмен лишь при испарении чистой жидкости (воды) со свободной ее поверхности. Поверхность объекта A_0 не всегда покрыта пленкой чистой воды и в испарении участвует лишь некоторая ее часть. Кроме того, в процессе жизнедеятельности или обработки продукта поверхность испарения может перемещаться в глубину, что создает дополнительное гидрлическое сопротивление. Наконец, испарение происходит не из чистой воды, а из раствора, что по закону Рауля также сказывается на интенсивности массообмена. Эти обстоятельства учитывают с помощью коэффициента сопротивления испарению $\mu = \beta_0 / \beta_0$ либо коэффициента испарительной способности $\epsilon_u = A_u / A_0$, т.е. в качестве основного принимают второй или первый источник погрешности. Расчет j ведут по формула

$j = \beta_0 \Delta p \mu^{-1}$ либо $j = \beta_0 \epsilon_u \Delta p$, иначе говоря, μ есть величина, обратная ϵ_u . Видимо, третий источник погрешности нельзя определять с помощью коэффициента при Δp , как это принимается в [66, 74], поскольку меняется сама движущая сила $\Delta p = p_n - p_r \neq$. Естественно предположить, что разработка методов прямого определения j при испарении с поверхности разных продуктов в условиях, близких к производственным, поможет выбрать рациональный способ учета всех этих погрешностей и измерения соответствующих коэффициентов.

В определении подобных коэффициентов есть нужда и при расчетах процессов обработки продуктов, крытых полупроницаемыми пленками [23]. Здесь целесообразно установить связь между тепло-массообменными характеристиками продукта и пленки. Отметим, что усушка имеет место даже для продуктов в гер-

Этичной упаковке [23]: неравномерность температуры по поверхности продукта приводит к испарению в одном месте и конденсации на внутренней поверхности пленки в другом. И в этом случае необходимо определять производные характеристики. Кстати, на этом основании мы отнесли обработку продуктов, упакованных в эластичную пленку, к контактным способам.

К производным тепломассообменным характеристикам в отдельных случаях нужно отнести и линейную скорость движения капельной жидкости или пара w , поскольку она связана с плотностью потока массы простым соотношением $j = w\rho$.

Производные характеристики лучистого теплообмена (поглощательная, отражательная и пропускательная способности, степень черноты тканей, продуктов и материалов) также играют существенную роль в практических расчетах. Наилучшим способом их определения, естественно, является прямое измерение соответствующих потоков: падающего, поглощенного и т.д., т.е. измерение локальных q . Интегральная излучательная способность является по существу не производной, а первичной характеристикой, поскольку отличается от q лишь формально.

Тепло и влага внутри растительных, животных тканей или продуктов могут переноситься самыми разнообразными способами: теплопроводностью, диффузией, гермовлагодисперсностью, бародиффузией, лучеиспусканием, конвекцией и т.д. Кроме того, влага может перемещаться в жидком или парообразном состоянии, в чистом виде или в виде растворов. Картина тепломассопереноса осложняется также фазовыми превращениями компонентов в широком диапазоне температур, химическими реакциями с выделением либо поглощением тепла. Движущие силы процесса влияют друг на друга и на результат переноса, поэтому раздельное экспериментальное определение производных характеристик не представляется возможным.

Единственно приемлемым выходом является разработка упрощенной модели процесса внутреннего тепломассопереноса и определение соответствующих эффективных характеристик, но обязательно при тепловых

и массовых нагрузках, имеющих место в производственном процессе. Для тепловых процессов такой моделью переноса в твердых, пастообразных, зернистых, желеобразных продуктах или живых тканях обычно принимается перенос энергии теплопроводностью [23, 6]. Использование методов теплотрии не дает возможности на данном этапе предложить более сложную модель, но позволяет получать адекватные эффективные характеристики. В соответствии с избранной моделью все производные тепломассообменные характеристики ткани или продукта относятся к так называемым транспортным теплофизическим характеристикам (ТФХ): теплопроводность λ , теплоемкость массовая c и объемная c_p , температуропроводность a , теплоусвоиваемость b , энтальпия i и некоторые другие.

Одной из основных ТФХ является теплопроводность $\lambda \equiv |q(q \text{ grad } t)|^{-1}$. Для идеальных газов и некоторых других веществ λ не зависит от пути перехода к данному состоянию. В силу перечисленных выше обстоятельств λ сырья и продуктов не может быть свойством, в отдельных случаях возможна даже зависимость $\lambda(q)$, что, впрочем, не является опровержением закона теплопроводности Фурье $q = -\lambda \text{ grad } t$. Эффективная характеристика переноса λ не обладает свойством аддитивности и теплопроводность смеси может быть выше теплопроводности каждого компонента.

Если учесть также разнородность состава многих продуктов в разных местах одного объекта и изменение его в процессе жизнедеятельности или обработки, то становится ясным, что функция $\lambda(x, y, z, \tau)$ ярко выражена и для ее определения необходимо уметь находить функцию $q(x, y, z, \tau)$.

Массовая и объемная теплоемкости сырья и продуктов c и c_p также не являются термодинамическими свойствами. Их отличие от свойств усугубляется тем, что обычно к теплоте, расходуемой собственно на изменение внутренней энергии продукта, которое проявляется в виде изменения его температуры, добавляют теплоту фазовых превращений. Некоторые из этих превращений зависят от того, нагревается или охлаждается объект (явление теплового гистерезиса).

Добавление теплоты фазовых превращений резко меняет эффективное значение c или $c\rho$, для разных объектов эти скачки происходят при разных температурах, особенно заметны они при замораживании продуктов. Естественно, что добавляется также теплота физико-химических превращений и химических реакций. Тем не менее обычно считают, что теплоемкость обладает свойством аддитивности, и многочисленные эксперименты подтверждают это свойство.

Для определения теплоемкости существуют разнообразные методы, особенно точны среди них калориметрические. Целесообразность разработки новых методов объясняется тем, что старые методы не дают возможности задавать и контролировать тепловые и массовые нагрузки, которые имеют место в производственном процессе, а это ставит под сомнение адекватность получаемых данных. Кроме того, калориметрические методы позволяют измерять только теплоемкость, а для лабильных материалов нужен метод комплексного определения всех основных ТФХ на одном образце.

Так как большинство процессов сельскохозяйственных производств являются изобарными, в технологических расчетах широко пользуются энтальпией i , вернее, изменением энтальпии продуктов Δi ; оно определяет общее количество подведенного тепла $Q = m \Delta i$. Поскольку $\Delta i = c_p \Delta t$, а для несжимаемых веществ $\Delta i = c \Delta t$, то сказанное выше о целесообразности разработки комплексного метода определения ТФХ, и в том числе теплоемкости c , относится и к изменению энтальпии Δi .

Наконец, в сложные ТФХ — коэффициенты температуропроводности $a = \lambda (c\rho)^{-1}$ и теплоусвояемости $b = \sqrt{\lambda c\rho}$ — входят и λ и c , и целесообразность комплексного определения ТФХ в данном случае выглядит еще более естественно.

1.3. Использование теплообменных характеристик при описании тепловых процессов методами теории подобия

Теория подобия или теория обобщенных переменных лежит в основе расчетов практически всех теплообменных процессов [36]. Остановимся на обобщенных переменных (числах или критериях подобия), которые для своего определения требуют информации о плотности потоков тепла и массы. Это еще раз подчеркивает значение такой информации, а также определит тенденции в построении новых обобщенных переменных на ее основе.

Энергию, поступающую от Солнца и других источников к растению, как правило, можно считать заданной в любой момент времени. Обычно эту характеристику называют облученностью. В технологии также все более широко применяют аппараты, в которых плотность теплового потока (через поверхность продукта) задана по условию (инфракрасные, электрические нагреватели и т.п.). Для расчета процесса при этом применяется комплекс $q(\tau)/(\lambda_n l^{-1} \Delta t) \equiv Ki$, названный А.В. Лыковым критерием Кирпичева. Его физический смысл трактуют как отношение плотности теплового потока, подводимого к поверхности объекта и отводимого за счет теплопроводности вглубь объекта [35]. Однако знаменатель здесь редко понимают как фактическая плотность теплового потока, видимо по двум причинам. Первая – трудности с измерением этой величины (методами теплотрии их легко преодолеть). Вторая причина состоит в том, что и числитель и знаменатель могут изменяться в процессе роста или обработки, а тенденция в составлении и использовании чисел подобия параметрического типа такова, что актуальное значение параметра относят к некоторой постоянной величине – масштабу.

Поэтому в знаменатель числа Ki обычно ставят условную величину q , что проявляется в условности Δt . Так, по А.А. Гухману Δt здесь – это разность каких-нибудь двух заданных по условию темпе

ратур [64]. В работе [35] А.В. Лыков определяет критерий Кирпичева как отношение плотности потока тепла q к максимально возможной q при условии, что градиент t на расстоянии l от поверхности продукта максимален и равен $\Delta t/l$, где $\Delta t = t_0 - t_n$. В дальнейшем, видимо, в связи с нечеткостью физического смысла максимальной q . А.В. Лыков дает рекомендацию выбирать Δt в соответствии с условиями задачи [36].

Величина $q(\tau)$ является суммарной плотностью и может передаваться к продукту по-разному, например, в растениеводстве или хлебопечении — лучистым и конвективным способами. В последнем случае их соотношение характеризует "мягкость" режима выпечки, поэтому в практических расчетах нашел применение предложенный А.С. Гинзбургом критерий выпечки $K_2 = q_\lambda / q_n$ [64]. В этой же работе приводится и критерий $K_1 = q_\lambda / (\lambda l^{-1} \Delta t)$, сходный с числом Ki , но в числителе стоит $q_\lambda = q(\tau) - q_n$, а в знаменателе $\Delta t = t_0 - t_n$. Используется здесь и число $q(\tau) / (\lambda l^{-1} \Delta t)$, которое названо объединенным (обобщенным) критерием Кирпичева.

Меньшее распространение при расчетах тепловых процессов получил массообменный аналог числа Кирпичева $Ki_m = j(\tau) / D l^{-1} \Delta c$. Здесь в числителе — фактическая плотность потока массы $j(\tau)$, а в знаменателе — некоторая условная интенсивность внутреннего массопереноса за счет диффузии, проявляющаяся в условии перепада концентраций Δc . Более распространены обобщенные переменные, в которые входят потоки тепла и потоки массы. Если последние вызваны фазовыми превращениями, то их вводят в комплексы в виде соответствующих тепловых потоков. Рассмотрим некоторые из этих комплексов, которые обычно именуют критериями процессов тепломассообмена.

При расчетах процессов обезвоживания грунта или сушки продуктов применяют два критерия, показывающие отношение плотностей теплового потока, расходуемых на испарение влаги q_n и на нагрев материала q_n . Критерий Коссовича записывают в виде

$Ko = r \Delta \bar{u} / (c \Delta \bar{t}) = \bar{q}_m / \bar{q}_n$. Здесь получаем отношение, среднее за весь процесс обезвоживания. Второй критерий учитывает кинетику сушки, т.е. локальность потоков во времени. Это – критерий Ребиндера $Rb = odt / (rdu)$. Расшифруем эту запись. Критерий Rb есть отношение плотностей теплового потока на нагрев объекта и на испарение влаги

$$Rb = \frac{q_n}{q_m} = \frac{c \rho l dT/d\tau}{r \rho l du/d\tau} = \frac{c}{r} \frac{dT}{du} \quad (1.3)$$

Такая форма критерия представляется более перспективной, общий расход тепла в расчете на единицу поверхности объекта для любого момента сушки записывается как $q = q_n (1 + Rb)$. Это уравнение можно подвергнуть дальнейшему обобщению. Если в качестве масштаба выбрать плотность теплоподвода в первом периоде сушки q_1 , то получим параметрические числа $X_q = q/q_1$ и $X_{qu} = q_n/q_1$

$$X_q = X_{qu} (1 + Rb) \quad (1.4)$$

При описании процессов конденсации и кипения аналогом критериев Коссовича и Ребиндера является критерий Кутателадзе $Ku = r/c\Delta t$ или отношение теплот фазового превращения и перегрева (переохлаждения) новой фазы. Чтобы получить число Ku в виде отношения плотностей теплового потока, достаточно числитель и знаменатель умножить на плотность потока массы.

Если такую же операцию проделать с критерием энергии связи Z_c [64], то получим отношения тепловых потоков, пошедших на разрушение связи влаги с каркасом ткани, например, при тепловой сушке сырья, и на испарение несвязанной воды $Z_c = q_c / (i r)$. Этот критерий, если найти способы его измерения в условиях, близких к производственным, может оказаться перспективным при определении рациональных режимов тепловой (холодильной) обработки, сопровождающейся удалением абсорбционно связанной влаги. Количество и скорость удаления связанной воды характерно

ривают в большой мере и качество готовой продукции, и производительность аппарата.

Из чисел подобия, в которые входят потоки массы, передаваемой различными способами, отметим так называемый критерий фазового превращения $\mathcal{E} = du_u/du = j_u/j$. Он встречается при описании процессов сушки и показывает долю суммарного потока массы внутри продукта, вызванную испарением влаги в нем.

Можно без преувеличения сказать, что вторичные по отношению к q и j характеристики применяются при составлении всех критериев подобия, применяемых при расчетах тепловых сельскохозяйственных процессов.

Одним из распространенных критериев интенсивности конвективного переноса тепла является число Пекле $Pe = wl/a$. Умножим числитель и знаменатель на перепад температур жидкости Δt в сечениях потока, отстоящих друг от друга на расстоянии l ,

$$Pe = \frac{wl}{a} = \frac{wpc\Delta t}{\lambda l^{-1}\Delta t} = \frac{jc\Delta t}{q_T} = \frac{q_K}{q_T}, \quad (1.5)$$

т.е. число Пекле есть отношение тепловых потоков, переносимых жидкостью на молярном уровне (конвекцией) и на молекулярном (теплопроводностью). Отметим, кстати, что в критерий Пекле для испарения $Pe_u = w_u l/a$ прямо входит плотность теплового потока q , поскольку $w_u = q/(\rho''r)$.

Легко представить в виде отношений плотностей потока тепла или массы основные числа подобия явления теплообмена или массообмена — числа Нуссельта (Nu и Nu_m) и Био (Bi и Bi_m), для этого числитель и знаменатель их нужно умножить на перепады температур Δt или концентраций Δc в потоке жидкости (за пределами пограничного слоя) и на поверхности соприкосновения жидкости и стенки (продукта).

Число Нуссельта при этом будет выглядеть как $Nu = \alpha l/\lambda = \alpha \Delta t/(\lambda l^{-1}\Delta t) = q_K/q_{Tж}$, т.е. как отношение тепловых потоков, переносимых в пограничном слое толщиной l конвекцией q_K и теплопроводностью

$q_{тж}$. Иначе говоря, величину $q_{тж}$ можно рассматривать как масштаб при определении q_k , ради которой и находят Nu как функцию актуальных для каждого типа конвективного теплообмена критериев подобия. Аналогичные рассуждения можно привести и для $Nu_m = \beta_c l / D = \beta_c \Delta c / (Dl^{-1} \Delta c) = j / j_D$ - получаем отношение потоков массы за счет конвекции (массоотдачи) и за счет диффузии в пограничном слое жидкости.

Сложнее провести эти рассуждения в отношении чисел Био $Bi = \alpha l / \lambda_T$ и $Bi_m = \beta l / D_T$, где индексы "Т" подчеркивают отношение характеристик λ и D к твердому телу (объекту). Эти числа трактуют как соотношение между внешним и внутренним (термическим или массообменным) сопротивлениями. Если α и λ_T / l умножить на $\Delta t = t_0 - t_n$, то получим в числителе q_k , в знаменателе же $\lambda_T l^{-1} \Delta t$ - несуществующий тепловой поток q_n , поскольку λ_T относится к твердому телу, а $\Delta t = 1$ - к жидкости. Поэтому иногда умножают на $\Delta t = 1$ и получают условные плотности теплового потока при единичном перепаде температур. Так, например, поступил А.В. Ков при объяснении физического смысла числа Био для нестационарной теплопроводности в условиях волнового разного измерения температуры с частотой ω [35].

Подчеркнем еще одно различие между членами Nu и Bi , имеющее прямое отношение к теме. Дело в том, что числители в выражениях $Nu = \alpha / \lambda_m l^{-1}$ и $Bi = \alpha / \lambda_T l^{-1} = q / q_n$ будут попарно одинаковыми только в случае конвективного теплообмена между твердым телом (продуктом) и капельной жидкостью, т.е. без лучистого теплообмена и фазовых превращений. Во всех остальных случаях в число Bi надо подставлять суммарную плотность теплового потока $q = q_k + q_\lambda + q_m$, а из числа Nu можно по-прежнему получить только q_k , т.е. конвективную составляющую сложного тепломассообмена. Мы здесь не рассматриваем других критериев подобия, которые применяются при интенсивном лучистом теплоподводе к материалу, типа критерия Старка $S_k = \sigma T^3 / (\lambda l^{-1})$ в расчетах сельскохозяйственных процессов они встречаются редко.

Из обобщенных переменных внутреннего теплообмена отметим так называемый критерий охлаждения пористых тел $K_{п} = j_{ж} c_{ж} / [\lambda_{т} l^{-1} (1 - \epsilon)]$, где ϵ - пористость материала. Этот критерий можно представить как отношение потоков тепла, переносимых конвективным движением жидкости внутри пористого объекта, к теплопроводности по твердому каркасу.

2. МЕТОДЫ КОНТАКТНОЙ ТЕПЛОМЕТРИИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

2.1. Энтальпийные методы

Среди экспериментальных методов определения плотности теплового потока в условиях контакта исследуемого объекта и теплоносителя большое место занимает группа энтальпийных методов [58]. Поскольку большинство рабочих процессов в сельскохозяйственных и перерабатывающих отраслях являются изотермными, количество теплоты, воспринятое объектом или теплоносителем, равно разности его энтальпий в начале и конце процесса. Несмотря на то, что собственно энтальпия объекта при этом не измеряется, указанное соотношение удобно для объединения этой группы. В зависимости от того, какое явление используется для измерения количества теплоты либо какой параметр непосредственно измеряется, используются различные энтальпийные методы.

Использование теплоты фазовых превращений.

Одним из наиболее распространенных методов подвода энергии при нагреве, сушке, упаривании, стерилизации самых разнообразных объектов является паровой обогрев. Это связано с большим количеством энергии, выделяющейся при конденсации пара. Теплота фазовых превращений (в данном случае - теплота конденсации) зависит только от давления конденсации, которое измеряется манометром, и равна разности энтальпий пара и конденсата. Для большинства теплоносителей теплота конденсации приведена в таблицах, поэтому измерение плотности теплового потока сво-

дится к определению количества конденсата, образовавшегося за определенный промежуток времени,

$$q = m(h_n - h_k)A^{-1} = V\rho(h_n - h_k)A^{-1}, \quad (2.1)$$

где m – расход пара, кг/с; h_n – энтальпия пара, Дж/кг; h_k – энтальпия конденсата, Дж/кг; V – объемный расход конденсата, м³/с; ρ – плотность конденсата, кг/м³.

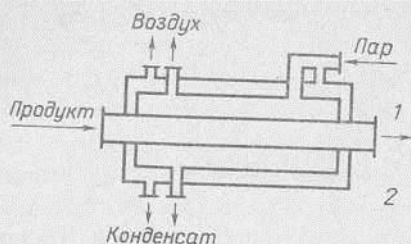
Если конденсируется сухой насыщенный пар, а темп. охладения конденсата можно пренебречь (она обычно не превышает 0,5% от общего количества передаваемой теплоты), то вместо разности энтальпий в (2.1) можно использовать теплоту конденсации r

$$q = V\rho r A^{-1}. \quad (2.2)$$

Пример лабораторной или производственной установки с паровым обогревом жидкого продукта приведен на рис. 2.1. По трубе 1 проходит нагреваемый продукт, она заключена в двойную паровую рубашку. Внутренняя и внешняя полости рубашки питаются перегретым на 1–2 К водным паром одинакового давления. В обеих полостях происходит конденсация пара, а поскольку процесс конденсации не только изобарный, но и изотермический, температура конденсирующегося пара в обеих полостях одинакова. Поэтому стенка внутренней полости является идеальной изоляцией, не пропускающей теплоты, и потребителем энергии пара из этой полости является только исследуемая труба 1, с которой на участке, обогреваемом паром из внутренней полости, и собирается конденсат для измерения его объема V или массы m .

Если для определения q пользоваться при этом уравнением (2.1), то необходимо, кроме давления пара, измерять еще его температуру, и затем по таблицам термодинамических свойств перегретого пара определять h_n и h_k . Ошибка в измерении температуры пара может вызвать погрешность в определении большую, чем при использовании более простой формулы (2.2). Вместе с тем использовать насыщенный

Рис. 2.1. Схема измерения плотности теплового потока по расходу пара



ный пар в таких установках нежелательно, поскольку трудно гарантировать отсутствие в насыщенном паре капелек воды, а их масса добавляется к массе конденсата m , что приводит к значительным погрешностям. Поэтому нужно обеспечивать небольшой перегрев пара.

Потери теплоты через фланцы и другие конструктивные элементы, для которых не удастся сделать идеальную изоляцию, учитываются опытами холостого режима, когда через исследуемую трубу продукт не прокачивают и она не должна в стационарных условиях совсем потреблять энергию.

Расчет q по (2,1) или (2,2) дает среднюю для трубы 1 плотность теплового потока. Чтобы получить информацию о q на отдельных участках трубы, организуют локальный теплоотвод конденсата с участков. Для этого внутреннюю полость снабжают продольными или поперечными перегородками, исключая перемешивание конденсата с соседних участков. Конденсат в каждом отсеке собирают в отдельный мерник, в (2,2) подставляют поверхность трубы, ограниченной данным отсеком. Более удобно секционировать отвод конденсата с вертикальных труб, при этом нужно заботиться, чтобы стекающий на данном участке конденсат не разбрызгивался за его пределы.

Если необходимо измерить q при охлаждении продукта, то можно подобрать жидкость, которая кипит в этих условиях. Однако образовавшийся пар целесообразно сконденсировать, чтобы точнее измерить его количество, т.е. методически этот способ сводится к предыдущему. При горизонтальном расположении исследуемой поверхности секционирование можно проводить вертикальными перегородками, не доходящи-

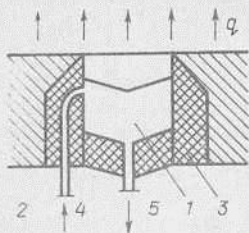


Рис. 2.2. Тепломер с локальным подводом пара

ми до самой поверхности. Пар из каждой секции направляется в отдельный конденсатор. Здесь особое внимание нужно уделить сепарированию пара от капель воды, чтобы получить перед конденсатором сухой пар. Если исследуемая стенка обращена теплоотдающей поверхностью вверх, то сравнительно просто организовать измерение q на площади 3–4 см² [76]. Это цилиндр 1 (рис. 2.2), отделенный от стенки 2 теплоизоляцией 3. Пар подается по трубке 4, конденсат отводится по трубке 5.

В отдельных случаях измерение количества конденсата проводят при определении теплоемкости или теплопроводности различных объектов [8]. В первом случае нагретый до заданной температуры объект помещают в сосуд с жидкостью, кипящей при более низкой температуре и находящейся в состоянии насыщения. Воспринимая теплоту от объекта, жидкость кипит и по количеству выкипевшей жидкости определяют количество теплоты. При определении теплопроводности измерялась q , передаваемая в стационарном режиме через объект в виде пластины (дальнейшие расчеты теплопроводности приведены в гл. 4).

Погрешность определения плотности тепловых потоков данным методом с учетом потерь и измерением количества конденсата в тщательно градуированных мерниках составляет в интервале $q = 10^3 \dots 10^5$ Вт/м² величину 3...5%. При $q < 10^3$ Вт/м² погрешности резко возрастают, поэтому целая группа рабочих процессов сельскохозяйственных производств не может быть обеспечена таким способом определения плотности тепловых потоков.

Иногда используют теплоту плавления, затвердевания или сублимации, хотя при взаимном превращении

твердой и жидкой фаз ее величина практически не зависит от давления, что удобно при проведении опытов. Отделение новой фазы для измерения теплового потока за время опыта более затруднено, чем при кипении или конденсации. Интересно отметить, что для контроля процесса производства сливочного масла оказалось целесообразным решать эту задачу наоборот: о количестве затвердевшего молочного жира судить по результатам тепловых измерений [64].

Плотность теплового потока q - важнейшая характеристика производственных процессов, поэтому целесообразно монтировать мерники конденсата на любых установках, использующих водяной пар - калориферы для сушилок зерна, плодов и овощей, стерилизаторы молока и т.д. Эти мерники можно использовать регулярно или периодически при испытаниях данного аппарата.

Измерение теплоты нагрева или охлаждения жидкостей. Изменение энтальпии жидкости или газа используется для измерения тепловых потоков так же широко, как и энергия фазовых превращений. В качестве калориметрической жидкости используется вода, аммиак (при низких температурах и т.п., в том числе и продукт, подвергаемый термической обработке).

Если давление и скорость жидкости на исследуемом участке канала изменяются незначительно, то измерению подлежат только ее расход (m) и изменение температуры (δt)

$$q = mc_p \delta t A^{-1}, \quad (2.3)$$

где c_p - массовая теплоемкость жидкости, Дж/(кг·К).

При малых расходах жидкости для их измерения лучше пользоваться мерниками, при больших - диафрагмой или соплом. В местах измерения температуры, изолированных для уменьшения теплотерь, жидкость надо тщательно перемешивать для получения среднеэнthalпийного значения температуры [37]. Термометры измерения пригодны лишь при изменении температуры на десятки градусов, при меньших изменениях применяют термометры сопротивления либо дифференциальные батареи термопар.

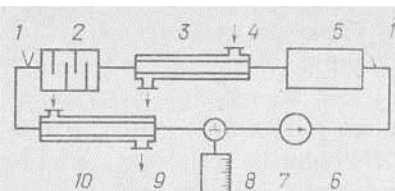


Рис. 2.3. Установка для измерения энтальпии жидкости

При исследовании процесса нагрева фруктовых пюре определяли изменение температуры и расход пюре (Q). Насос 6 (рис. 2.3) перекачивает жидкость в ресивер-покойтель 5 для сглаживания пульсаций, после нагрева жидкости паром 4 в теплообменнике 3 она попадает в смеситель 2, затем в холодильник 10, в котором тепло отводится водой, откуда снова попадает в насос. Смеситель снабжен лабиринтом, проходя которому жидкость перемешивается и выравнивает температуру. Термодатчики 1 вмонтированы в трубопровод перед успокоителем и после смесителя. Неизменно показаний термодатчиков свидетельствует о наступлении установившегося режима, после чего на некоторое время, фиксируемое автоматическим таймером, поток жидкости краном 7 направляется в бак 8 для взвешивания.

Локальные значения q по длине трубы можно получить, если удастся делать достаточно много измерений температуры, чтобы вычислить производную температуры по длине dt/dl

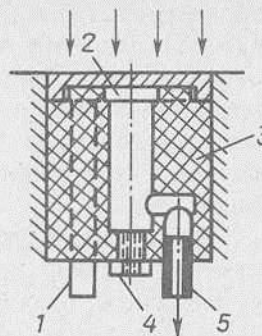
$$q = \frac{m \cdot c_p}{\pi d} \cdot \frac{dt}{dl}, \quad (2.1)$$

где d и l — диаметр и длина трубы.

После измерения температуры по ходу ее изменения находят величину градиента dt/dl в каждой точке. Для равномерного распределения охлаждающей воды в кольцевом зазоре между коаксиальными трубами при этом приходится применять специальные меры, например, перемешивать поток воды вдуванием в нее сжатого воздуха.

Локальные значения плотности теплового потока через стенку, охлаждаемую проточной жидкостью, можно определить, выделяя часть этой жидкости (с измерением ее расхода) для прохода через

Рис. 2.4. Тепломер с локаль-
ным подводом жидкости



Тепломер (рис. 2.4). Его приемная пластинка 2 диаметром 15...25 мм выполнена из того же материала, что и основная стенка, а корпус 3 - из теплоизоляционного материала. Вода поступает в корпус по патрубку 1, омывает приемную пластину и отводится через патрубок 5. Проводники дифференциальной термопары, служащей для измерения прироста температуры воды, выводятся через сальник 4. Приемный диск теплоизолирован от основной стенки тонким слоем стекла. Для термопары нужно выбирать тонкие проводки из сравнительно плохо проводящих тепло материалов (хромель, конпель, константан) для предотвращения утечки тепла по термоэлектродам.

Войба с утечками тепла при использовании этого метода уменьшает его преимущества по сравнению с методом фазовых превращений (большой диапазон измерения плотности теплового потока, удобство проведения опытов). Точность измерения примерно такая же, но иногда погрешность удается снизить до 1-2%. Для этого организуют, например, самоулавливание тепловых потерь. Нагреваемый продукт проходит при этом по лабиринтному пути так, что по обе стороны стенки оказывается продукт с примерно одинаковой температурой [64].

Некоторые теплообменные аппараты сельскохозяйственных производств, например пластинчатые охладители или пастеризаторы молока, весьма компактны, рабочая теплообменная поверхность у них на два порядка больше, чем поверхность теплообмена с окружающей средой. Потеря теплоты для таких аппаратов 5-1500к

составляет десятые доли процента и можно считать, что они покрыты идеальной изоляцией. В этом случае использование теплоты нагрева или охлаждения жидкости может дать более высокую точность в определении тепловых потоков, чем использование тепловых фазовых превращений, причем в производственных условиях.

Инерционные тепломеры. В данном методе используется тепловая инерция твердых тел, т.е. способность накапливать энергию при подводе теплоты. Как и в предыдущем случае, измерению подлежит изменение температуры тела, однако не в различных точках потока жидкости, а в одной и той же точке, но в различные моменты времени. Поэтому если метод использования нагрева жидкости применяют при стационарном режиме переноса теплоты, то инерционные тепломеры — нестационарные. Если определить изменение среднеэнтальпийной температуры твердого тела δt за время $\delta \tau$, то расчет q проводится по формуле, аналогичной (2.2)

$$q = \frac{mc \cdot \delta t}{A \cdot \delta \tau}, \quad (2.4)$$

где m и c — масса и массовая теплоемкость твердого приемника энергии.

Как следует из теоретического решения задачи о нагревании постоянным тепловым потоком цилиндра через один торец, когда другой торец и боковые поверхности теплоизолированы, изменение среднеэнтальпийной температуры цилиндра можно измерять в точке, отстоящей на 0,575 высоты цилиндра от теплопринимающей поверхности. Чтобы не заботиться о точном расположении головки термопары, выполняют приемный цилиндр из материала с высокой теплопроводностью, чаще всего меди. Кроме того, если организовать непрерывную запись температуры цилиндра, то можно определить производную от температуры по времени $dt/d\tau$ и считать q по формуле

$$q = \frac{mc}{A} \cdot \frac{dt}{d\tau}. \quad (2.5)$$

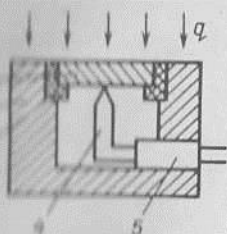


Рис. 2.5. Инерционный тепломер

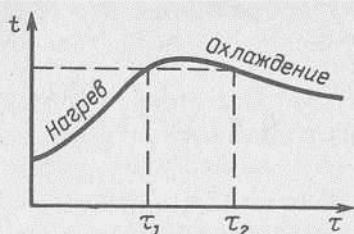


Рис. 2.6. Изменение температуры инерционного приемника

При этом место установки термопары зачастую не играет такой большой роли, как при использовании формулы (2.4), например, если температура среды, с которой соприкасается приемник, меняется по линейному закону.

Конструктивно инерционный тепломер оформляется по-разному, часто в виде медного диска 1 (рис. 2.5), который отделен от медного корпуса 2 теплоизоляционной прослойкой 3. Спаи термопары 4 закрепляются на внутренней поверхности диска, термоэлектроды выводятся из корпуса через керамическую трубку 5. В качестве теплоизоляции можно использовать войлок; тогда приходится для крепления диска использовать стержни или нити с малой теплопроводностью. Теплоотвод по электродам термопары также нежелателен.

Размеры медного корпуса выбираются такими, чтобы отношение площади тепловоспринимающей поверхности к теплоемкости корпуса были такими же, как у приемного диска. В этом случае температуры корпуса и диска будут примерно одинаковы, теплообмен между ними невелик. Все же в устройствах подобного типа избежать теплопотерь от диска не удастся. Их можно учитывать, если, кроме кривой роста температуры диска, записать кривую его охлаждения после прекращения нагрева за счет снижения температуры жидкости до максимального уровня, достигнутого диском. В этом случае расчетная формула для φ включает

$$D^3 = 1500K$$

две производные: при нагреве $(dt/d\tau)$ в момент времени τ_1 и при охлаждении $(dt/d\tau)$ в момент

$$q = \frac{mc}{A} \left[\left(\frac{dt}{d\tau} \right)_H - \left(\frac{dt}{d\tau} \right)_O \right]. \quad (2.6)$$

Поскольку, как видно из рис. 2.6, производная при охлаждении получается отрицательной (она берется при той же температуре, что и основная производная), то ее учет увеличивает q на величину потерь.

Все эти меры позволяют говорить об измерении конвективных, кондуктивных и лучистых потоков с погрешностью 3...7% в широком диапазоне изменения температуры. Тепломеры данной группы применяются в приборостроении для измерения теплопроводности различных материалов ИТ-Л-400 и КДМ-Л-900 [61], которые выпускаются Актюбинским приборостроительным заводом.

Если измеряемая q меняется с большой скоростью, то толщину приемного диска уменьшают, чтобы его инерционность была сопоставима с инерционностью изучаемого процесса теплоотдачи. В отдельных случаях применяют металлические пленки толщиной в сотые доли миллиметра. Для измерения температуры приемника используют сам приемник (пленку) в качестве термометра сопротивления. Если же время изменения теплового режима измеряется микросекундами, то применяют еще более тонкие пленки толщиной менее одного микрометра (10^{-3} мм). Такие пленки получают напылением в вакууме на подложки из изоляционного материала. При напылении двух термоэлектродных материалов (железо - никель, родий - платина) получают тонкопленочную термопару, по показаниям которой судят о плотности теплового потока. Расчетные формулы и подробные сведения для таких тепломеров приведены в [14, 63].

2.2. Электротепловой метод

Электрический обогрев в сельскохозяйственных и перерабатывающих отраслях все шире применяется не только в лабораторных, но и в производственных условиях. С внедрением этого способа повышается произ-

интенсивность труда и культура производства, а некоторым удорожание продукции компенсируется качеством и количеством продукта.

Преимущества этого способа подвода тепла состоят также в простоте регулирования, компактности нагревательных устройств и высокой точности измерения Джоулева тепла. В установившемся режиме такое же количество теплоты передается теплопроводностью или конвекцией, поэтому электронагреватель может служить чувствительным элементом в контактной теплотрассе. Некоторые авторы [61] относят этот метод к группе энталпийных методов, но поскольку ни один из параметров либо производных в уравнениях (2.4)...(2.5) не измеряется, целесообразно выделить его в самостоятельный метод. Измеряется здесь лишь падение напряжения и сила тока ваттметрами либо амперметрами и вольтметрами (класс точности достигает до 0,05 %, поэтому в общем погрешность измерения q здесь меньше). Однако для измерения плотности теплового потока, проходящего через участок грунта или стенки аппарата, необходимо устанавливать дополнительные "охранные" нагреватели, чтобы компенсировать потери теплоты в окружающую среду, или тщательно изолировать основной нагреватель. Охранные нагреватели играют роль внешней камеры в установках с паровым обогревом, но идеальную изоляцию здесь организовать значительно труднее и надо применить систему дифференциальных термопар, окружающих стенку между нагревателями. При нулевом значении терморпар теплопотери от основного нагревателя равны нулю. Точность такой компенсации определяется равномерностью расположения спаев термопар и чувствительностью регулятора мощности охранных нагревателей. Установка обычно получается громоздкой.

Необходимость в компенсационных нагревателях возникает, если основной нагреватель располагается внутри грунта или жидкости. Электрообогрев непосредственно трубки, проволоки или ленточки стал в последнее время широко применяться, в особенности при изучении кипения жидкости. Различные исследователи

отмечают, что при этом наблюдается явление невоспроизводимости опытов: при кипении обезжиренного молока, сливок и даже водяного конденсата с общим содержанием не более 8 мкг-экв/л существенно няется термическое сопротивление теплоотдаче [65]. По-видимому, при этом проявляется принципиальное отличие электрообогрева от обогрева, например, конденсирующимся паром. Электрообогрев характеризуется заданием граничных условий второго рода для внутренней поверхности стенки, т.е. плотность теплового потока зависит от ее термического сопротивления. Отложение малейшего слоя накипи из кипящего продукта приводит к увеличению термического сопротивления, а следовательно, и температурного напора. В свою очередь это ведет к повышению температуры накипи, что часто сопровождается увеличением скорости ее кристаллизации. Результатом является лавинообразный процесс отложения накипи и увеличения термического сопротивления.

Паровой обогрев соответствует граничным условиям третьего рода — температурный напор и коэффициенты теплоотдачи остаются постоянными. Увеличение термического сопротивления стенки приводит к снижению плотности теплового потока (и снижению производительности аппарата), но ускорения нарастания накипи не наблюдается. Особенно опасно применение электрообогрева для уваривания накипеобразующих продуктов в области перехода от обычного пузырькового кипения к пленочному, когда коэффициент теплоотдачи становится значительно ниже. Незначительное случайное увеличение q может привести к резкому возрастанию температурного напора. Температура стенки, а также электронагревателя могут превысить допустимую для данных материалов, что и приведет к их разрушению.

Закладывать электронагреватели можно и в груду или твердый продукт и определять среднее значение таким же образом, как для конвективного теплообмена. Определение локальных q удобно в условиях эксперимента, например при сублимационной сушке продуктов либо при определении теплопроводности этих продуктов [65].

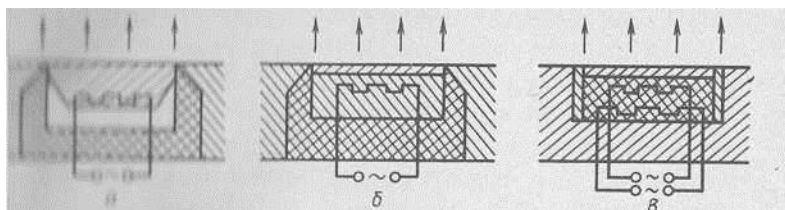


Рис. 2.7. Электротепломеры

Разновидности электрических тепломеров представлены на рис. 2.7. В модели 2.7,а используется так называемая обратная тепловая линза: в суженной части медного блока закладывается проволочный электронагреватель, основной поток теплоты идет через блок через его большее основание к испытуемому продукту. При прохождении через коническую часть блока плотность теплового потока уменьшается, расчет q можно ввести по формуле

$$q = \frac{I \cdot \Delta U}{qA}, \quad (2.7)$$

где I и ΔU — сила тока через нагреватель и падение напряжения на нем; A — площадь большого торца блока; q — эффективность нагревателя.

Эффективность нагревателя (аналог КПД) определяется, например, в опытах "холостого хода", когда испытуемая поверхность закрывается хорошей теплоизоляцией, однако при этом необходимо в остальном соблюдать строго тот же температурный режим объекта.

В моделях 2,7,б и 2,7,в используются тонкопленочные электроннагреватели, которые накладываются непосредственно на испытуемую поверхность. Если эти нагреватели выполнять из отдельных электроизолированных друг от друга ленточек константана или других сплавов, то их можно использовать в качестве термометров сопротивления и таким образом получать распределение температуры по приемной поверхности тепломера. В этом случае можно в некоторой мере уменьшить недостаток, присущий всем электрическим тепломерам на участке, занятом прибором, плотность теплового потока и температура могут существенно отли-

чатся от этих показателей на других участках исследуемой поверхности. При этом набегающий на участок с тепломером теплоноситель будет иметь другие гидродинамические и теплофизические характеристики, повлияет на интенсивность теплоотдачи. Измерение распределения температур по поверхности тепломера и возможность приблизить это распределение к условиям исследуемой поверхности. Если для материала нагревателя подобрать металл с линейной зависимостью температуры от электрического сопротивления, то температура рассчитывается по формуле

$$t = t_0 + (R - R_0)b, \quad (2.8)$$

где t и R — измеряемые температура и сопротивление, t_0 и R_0 — то же при нулевой температуре.

Коэффициент b необходимо определять опытным путем после монтажа нагревателя, например с помощью термостата.

Все большее распространение получают электронагреватели, образуемые напылением металла в вакууме либо химическим путем. Можно использовать старый рецепт получения зеркал: приемная поверхность тепломера обрабатывается поочередно раствором хлористого цинка и азотного серебра, при этом образуется пленка серебра толщиной около одного микрометра. Благодаря применению очень тонких слоев металла помещаемых на хороших теплоизоляторах, теплопроводность вдоль этих слоев пренебрежимо мала даже при больших градиентах температуры на исследуемой поверхности.

Интересная возможность измерения плотности теплового потока и визуализации распределения температуры получается при использовании прозрачных для видимого спектра пленок золота толщиной в несколько ангстрем [77]. На поверхность теплоизолятора последовательно накладываются слои черной подложки жидких кристаллов, меняющих цвет в зависимости температуры, электронагревателя из пленки золота наконец, прозрачного пластика, например полиэтилена.

Танновую и гидродинамическую картину набегающего потока можно приблизить к реальной, если электротепломер сделать в виде модели, геометрически подобной исследуемому продукту или материалу. Такой прием использовали И.Г. Чумак и В.В. Московченко при изучении теплоотдачи от поверхности мясных полутуш в воздух при их охлаждении [65]. Модели изготовились натурального размера, электротепломер служила лишь задняя треть полутуш, включающая бедро, охлаждение которого наиболее энергоемко. Эту часть модели делали из алюминия, внутри нее монтировали трубчатый электронагреватель. Торцевую поверхность алюминиевой модели теплоизолировали, а остальную часть модели делали из папье-маше. Лучистый теплообмен сводили к минимуму, полируя алюминиевую часть модели. Плотность теплового потока определяли в установившемся режиме и контролировали по величине коэффициента теплоотдачи в опытах с использованием регулярного режима первого рода, когда алюминиевая модель служила альфакалориметром [65].

Применение высокотеплопроводного алюминия несомненно приводило к выравниванию тепловых потоков и температур по поверхности модели. Таким образом, увеличение размеров тепломера до размеров целой модели явилось лишь половинчатой мерой по моделированию конвективного теплообмена к образцу. Натурные данные по теплотрии мясных полутуш показали большую неравномерность тепловых потоков по их поверхности [65].

Таким образом, электротепломеры с локальным тепловыделением можно рекомендовать лишь для модельных либо сравнительных испытаний различного теплообменного оборудования. Известны попытки использовать этот метод в условиях теплоотвода от изолированных ограждений, когда малая часть поверхности ограждения закрывается плохо проводящей тепло прокладкой, а затем — плоским электронагревателем [14, 60]. Измерения температуры по обе стороны прокладки и добиваясь их равенства между собой с помощью регулируемого электронагревателя, полагают, что плотность теплового потока к воздуху при этом такая же,

как если бы термомер не был наложен. Несмотря на кажущуюся абсолютность, этот метод распространения не получил из-за больших погрешностей, связанных с трудностью установления нулевого перепада температур на обеих поверхностях прокладки, а не в отдельных точках.

2.3. Градиентные методы

Если теплота в объекте переносится главным образом за счет теплопроводности, для определения плотности теплового потока можно использовать закон Фурье

$$q = -\lambda \operatorname{grad} t. \quad (2.9)$$

Зная теплопроводность материала стенки λ и градиент температуры $\operatorname{grad} t$, можно вычислить q . Для определения градиента нужно иметь профиль температуры по пути теплового потока, что получают обычно с помощью термопар, закладываемых в объект. Градиентный метод широко применяется в сельском хозяйстве при измерении тепловых потоков через почву или через ограждение кагата свеклы, т.е. там, где небольшая ошибка в месте закладки термопары не скажется на результатах, иными словами при больших размерах объекта.

Теплопроводность объекта определяют в лабораторных условиях. Очень важно при этом получить эффективное значение λ , поскольку, кроме теплопроводности, имеет место обычно перенос теплоты лучеиспусканием в порах объекта, заполненных газом и конвекцией, причем для тех же тепловых и температурных нагрузок, которые имеют место в производственных или полевых условиях. Этим требованиям отвечают методы определения λ , изложенные в гл. 4.

Вместо градиента, как правило, измеряют перепад температур Δt на определенной толщине слоя объекта δ , после чего определяют q по формуле

$$q = \lambda \Delta t \delta^{-1}. \quad (2.10)$$

При таком переходе необходимо помнить, что уравнение (2.9) пригодно для расчета q в любом

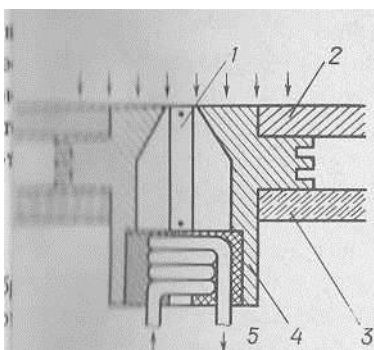


Рис. 2.8. Градиентный тепломер

равенство переноса (стационарном или нестационарном), $Q = \lambda \Delta t$ — только в стационарном или квазистационарном, причем если в интервале Δt — можно считать, что λ не зависит от t .

Конструктивное оформление градиентного тепломера, предназначенного для измерения тепловых потоков от высокотемпературных продуктов сгорания к охлаждаемой проточной водой металлической стенке, представлено на рис. 2.8 [76]. Медный стержень 1 диаметром 5,85 мм и длиной измерительного участка (между спаями термопар) 29 мм одним торцом заделан заподлицо с испытуемой стенкой 2, а второй его торцевой охлаждается водой, протекающей в змеевике 5. Между стержнем и медным корпусом 4 оставлен зазор 0,2 мм. Основную стенку охлаждает вода, проходящая в щели между ней и стенкой 3 из оргстекла. Авторы [76] отмечают, что для таких условий были обеспечены изотермичность испытуемой поверхности и торца стержня, а также пренебрежимо малые боковые потери теплоты от стержня.

Градиентный метод является основным при исследовании тепловых потоков из глубины Земли на суше и в океане [14]. Часто этот метод применяется для решения обратной задачи: по известным значениям плотности теплового потока и перепаду температур определяют теплопроводность грунтов или продуктов.

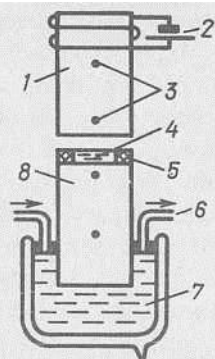


Рис. 2.9. Установка для определения теплопроводности

С помощью установки, приведенной на рис. 2.9, Чан и Меррил определяли теплопроводность бананового яблочного пюре [65]. Источником тепла являлись стержня 1 и 8 из железа "армко" длиной 30 и диаметром 5 см. Верхний торец верхнего стержня обдувается с помощью электронагревателя 2, нижний конец нижнего опущен в сосуд Дьюара 7 с проточной водой 6. В оба стержня на расстоянии 20 см друг от друга по оси заделаны по две термопары 3. На верхний конец нижнего стержня наклеено бакелитовое кольцо 5 толщиной 25 мм, образующее измерительную ячейку для продукта 4. Верхний стержень прижимается к кольцу, замыкая ячейку. По показаниям термопар контролируют наступление установившегося режима, затем рассчитывают теплопроводность продукта λ по формуле

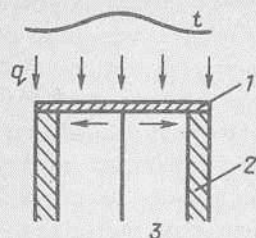
$$\lambda = \frac{\delta \lambda_1 (q_1 + q_2)}{2\lambda_A (t_a - t_b) - (q_1 + q_2)(\delta_1 + \delta_2)}, \quad (2.1)$$

где λ_1 - теплопроводность железного эталона; t_a и t_b - температуры в точках a и b ; δ_1 и δ_2 - расстояние от точек a и b до слоя продукта; q_1 и q_2 - плотности теплового потока через верхний и нижний стержень.

Для расчета q_1 и q_2 по формулам (2.9) и (2.10) используют показания соответствующих термопар. Формула (2.11) несколько усложняется, если учесть температурную зависимость теплопроводности стержней. При условии $\delta_1 = \delta_2$ средняя температура продукта определяется как $0,5(t_a + t_b)$. Боковые потери стержней полагаются одинаковыми, поэтому плотность теплового потока, проходящего через слой продукта, также рассчитывается по среднеарифметической формуле $q = 0,5(q_1 + q_2)$.

Разновидностью градиентного тепломера является датчик с круглой мембраной из фольги [157]. Предложенный Гардоном в 1953 г. для измерения лучистых потоков этот датчик стал применяться и для конвективных тепловых потоков. Американское общество испытанию материалов (ASTM) в 1980 г. при

рис. 2.10. Термомер с поперечным перетеканием теплоты



Для метода измерения тепловых потоков в качестве чувствительного,

Кружок константановой фольги 1 (рис. 2.10) приклеен по окружности среза полого медного цилиндра 2. В центре фольги приварена тонкая медная проволока 3. В фольге образованы два спая медь-константановой термопары: одна в центре, вторая - по краю мембраны. Теплота, воспринимаемая мембраной, растекается по радиусу и сопротивление фольги создает радиальный градиент температуры. ЭДС термопары служит выходным сигналом датчика, который пропорционален плотности теплового потока, подводимого к мембране или отводимого от нее (на рис. 2.10 приведено распределение температуры по радиусу датчика для первого случая). Коэффициент теплопроводности константана и термоэлектрический коэффициент термопары почти одинаковы и изменяются с колебанием температуры, поэтому зависимость выходного сигнала датчика не является линейной температурой в довольно широком диапазоне изменений.

Для надежной работы такого датчика медный цилиндр 2 необходимо охлаждать (в случае горячего теплоносителя), например проточной водой, что усложняет его использование. Эти датчики с поперечной (по радиусу) составляющей теплового потока нуждаются в специальной градуировке, точность которой в основном и определяет погрешности измерения теплового потока.

Нередко перепад температур на металлической стенке можно получить, используя в качестве термометров сопротивления (вместо термопар) саму стенку. Достаточно оригинален метод измерения тепловых потоков через стенку круглой трубы, когда цилиндрические слои

трубы служат своеобразными термометрами. При измерениях используют скин-эффект: пропуская по участку трубы постоянный ток, получают значение сопротивления этого участка как функцию средней по радиусу температуры; затем, пропуская переменный ток, получают функцию от температуры наружных слоев трубы. Сравнение этих двух функций при известной теплопроводности материала трубы дает представление о тепловом потоке через стенку данного участка трубы. Отмечено [14], что при использовании переменного тока частотой 830 с^{-1} можно получить четкую зависимость для теплового потока. Погрешность измерений этим методом можно оценить в 10...15%.

2.4. Метод вспомогательной стенки

Одна из разновидностей градиентного метода – применение вспомогательной стенки с известной теплопроводностью – широко распространена при измерении тепловых потоков в самых различных, в том числе и сельскохозяйственных, отраслях. Эта стенка точно или полностью замещает основную (рис. 2.11, а, б) либо является дополнительным термическим сопротивлением (рис. 2.11, в), поэтому ее принято называть дополнительной стенкой. Если поверхность соприкосновения стенок является изотермической, можно пренебречь изменением λ вспомогательной стенки по ее толщине δ , то искомая плотность теплового потока q определяется из уравнения (2.10), где в данном случае – это перепад температур на вспомогательной стенке, который необходимо измерить.

Наложение вспомогательной стенки не должно вызывать заметного изменения общего термического сопротивления цепи, проводящей измеряемый тепловой

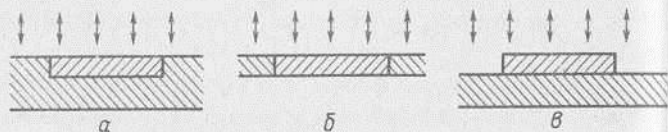


Рис. 2.11. Варианты установки вспомогательных стенок

ств. Необходимо знать с большой точностью λ и δ и градуировать каждый тепломер по известному тепловому потоку, оценивая возможные искажения температурного поля и контактное сопротивление. Для лабораторных измерений идея вспомогательной стенки была предложена К. Христиансенем еще в XIX веке, а для промышленных и сельскохозяйственных объектов реализована в начале XX века К. Хенки и Э. Шмидтом [15].

Для измерения теплопотерь через изоляцию на крупных трубопроводах с паром и горячей водой до сих пор применяют ленточный тепломер, предложенный Шмидтом - "пояс" Шмидта. В качестве вспомогательной стенки используют резиновую ленту длиной 60...650 мм, шириной 60...70 мм и толщиной 1...3 мм. На обеих поверхностях ленты 1 располагают попеременно около 200 спаев дифференциальной термопары 2, соединенных последовательно (рис. 1.13). Затем поверхности ленты покрывают тонким слоем резины и вулканизируют, так что толщина ленты увеличивается до 5...7 мм. При накладывании вспомогательную ленту прижимают к ней натяжными устройствами 4. С боковых сторон пояса накладывают внешнюю вуку по величине резиновые ленты 3 без термопар для устранения искажений теплового потока через основную ленту.

Теплопроводность резины зависит от температуры, поэтому одновременно с температурным перепадом измеряют и температуру ленты. Для этого головку термопары, прижатую к тонкому металлическому диску, вставляют под ленту. Расчет q ведут по формуле

$$q = \epsilon_0 (1 - \alpha t) e, \quad (2.12)$$

где ϵ - термоЭДС тепломера; α - температурный коэффициент теплопроводности резины; ϵ_0 - постоянная для данного тепломера, учитывающая параметры вспомогательной стенки и термопары.

Поперечность этих тепломеров составляет 3-4 ч, а точность измерения q в интервале $10^1 \div 10^3$ Вт/м².

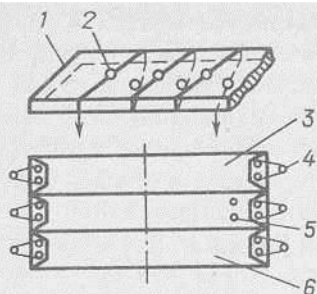


Рис. 2.12. Пояс Шмидта

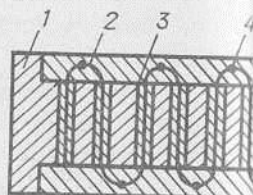


Рис. 2.13. Устройство для измерения тепловых потоков через грунт или снег

5...8%. Проверку точности производят заменой термометров на одном объекте.

А.С. Махновецкий предложил производить измерения ленточным тепломером, не ожидая стационарного режима. Для этого применяется дифференциальная термопара, один спай которой закладывается в ленточный тепломер, а другой закрепляют в воздухе на некотором расстоянии от него [14]. При наложении тепломера на испытуемую изоляцию сразу начинают записывать показания тепломера и термопары, и по характеристикам этих записей судят о плотности теплового потока, которая будет иметь место в установившемся режиме.

Для испытания изоляционных ограждений и перегородок производственных холодильников разработан новый вариант тепломера. Это резиновый диск диаметром 300 мм и толщиной 6 мм, в центральную часть которого (около 200 мм диаметром) вмонтированы по двойной спирали Архимеда 600...900 спаев термопарной батареи так, что клеммы находятся рядом, на одной стороне диска. С обеих сторон на диск вулканизированы слои резины толщиной 2 мм. Чувствительность тепломера достаточна, чтобы измерить теплоток через перегородку соседних камер с разными температурами хранения сельскохозяйственной продукции (ниже 1 Вт/м^2). Основными недостатками дискового тепломера, как и пояса Шмидта, являются большие

различных размеров и инерционность, а также зависимость показаний тепломера от его температуры.

Для измерения тепловых потоков со дна водоемов, через замерзающий грунт, слой снега или льда в качестве вспомогательной стенки можно применять полиметилметакрилат (плексиглас), так как его теплопроводность близка к теплопроводности льда и он не набухает в воде (рис. 2,13). В пластинке 1 тепломера, имеющей размеры 250x200x25 мм, просверливают около 1000 отверстий 3, через которые продевают медную константановую проволоку, соединяя их после скрутки 4 обжимным припоем. Пластинка с обеих сторон наливается раствором плексигласа в дихлорэтане 2 для изоляции термопар от воздействия воды и агрессивных сред. Раствор заполняет и отверстия под проволоку, так что после испарения дихлорэтана вся конструкция получается монолитной [14]. Успешно применяется в качестве вспомогательной стенки для этих целей и стекло, теплопроводность которого примерно такая же, как у почвы. На стеклянную пластинку 75x50x2,5 мм навивали константановую проволоку, затем пластинку до половины опускали в электролит так, что места перехода от меденного константана к константану приходились на центры обеих поверхностей пластины. Получилась электролитическая гипертермопара, сигнал которой пропорционален разности температур на гранях, а следовательно, и тепловому потоку. Изоляция термоэлектродов осуществлялась полиэфиром. Густая навивка проволоки позволяет получить большое количество термопар, и чувствительность такого тепломера оказалась достаточной, чтобы непрерывно производить автоматическую запись тепловых потоков в почве [65].

Процессы переноса тепла в грунте, снеге, теплопроводности, слое зерна, в большинстве пищевых продуктах осуществляются переносом влаги или пара. Описанные тепломеры имеют значительные габариты, и их установка в грунт или другой объект мешает массопереносу, а поскольку процессы массопереноса и теплопереноса неразрывно связаны, то установка тепломера приводит к существенному изменению плотнос-

ти теплового потока. Для измерения тепловых потоков через почву Д. Портмен в 1958 г. применил перфорированные тепломеры - в стенке тепломера размером 115x115 мм проделывали 25 отверстий диаметром 5 мм, располагая их равномерно и так, чтобы они были достаточно далеко от спаев термопар [15].

Интерес представляет также предложение В.В. Банова и Е.П. Галямина подбирать для вспомогательной стенки материал, обладающий дисперсностью, ристостью и теплопроводностью, близкими к этим характеристикам почвы. Безусловно, теплопроводность керамической пластинки зависит от влажности и температуры, и эти зависимости не могут быть в точности такими же, как у почвы. Поэтому внутри керамической стенки 1 (рис. 2.14) необходимо заключить при ее изготовлении электрический нагреватель 2 и дополнительную термопару 4. С их помощью можно производить проверку эффективной теплопроводности керамической пластины, не вынимая тепломер из почвы. Для этого через нагреватель пропускают большой ток - в установившемся режиме измеряют температуру в центре пластины и на одной из ее поверхностей (для чего там закрепляют второй спай центральной термопары). Из формулы (2.10), подставляя в нее значение половины толщины пластины, считают ее теплопроводность. Нагреватель выключают, снова ожидают наступления стационарного режима (что устанавливают по стабилизации сигнала дифференциальной гипертермопары 3) и затем из того же режима, подставив в него полную толщину пластины, определяют перепад температуры на ней, рассчитывают плотность теплового потока. Такой способ самоградуировки тепломера в условиях опыта можно рекомендовать, если процессы обладают большой длительностью и близки к стационарным.

Своеобразный вариант дополнительной стенки использовали Р. Лоутон и др. [65] при определении теплоотдачи и термогенеза животных. Стенки камеры, в которую помещают испытуемое животное, обклеивали целиком теплотетрической тканью (рис. 2.15). Эта ткань представляет собой переплетение медьконстантановых

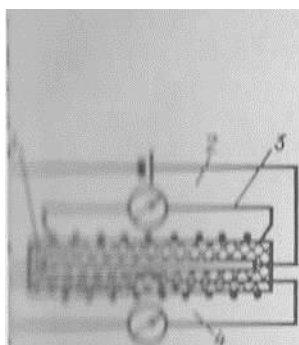


Рис. 2.14. Термомер с пористой стенкой

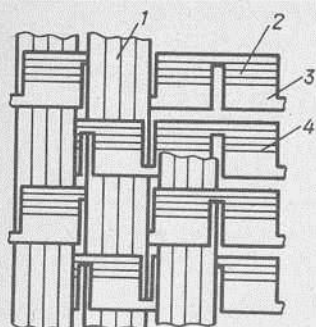


Рис. 2.15. Устройство термометрической ткани

слоев 2 и 3 с ленточками из стеклоткани 1. Полосы нарезаны попеременно с обеих сторон так, что остаются медные либо константановые перемычки. При увлажнении стеклотканью соседние места контакта с константаном 4, играющие роль спаев, оказываются под стеклотканью либо над нею. Их температура снижается при прохождении теплоты на величину перепада на стеклоткани. Поскольку полосы соединены последовательно, сигнал термобатареи получается большим при малой инерционности, так что можно наблюдать кинетику термогенеза или теплоотда-

чи. Вместо термопар для измерения перепада температуры на стенке применяют термометры сопротивления, но монтаж термопар затруднителен, например, если в качестве вспомогательной стенки применяют керамику. Известно несколько конструкций таких термомеров (70), в отдельных случаях термометром сопротивления служил тонкий слой платины, получаемый методом вжигания платиновой краски в поверхности окислительной пластины. В других случаях в качестве термометра сопротивления использовалась никелевая проволока. Такими термомерами пользовались при измерении тепловых потоков в почве теплицы в процессе прогрева (8). Для повышения водостойкости стержень несколько раз покрывали хлористой медью и битумом (аналог эпоксидной смолы). Дж. Клемс и

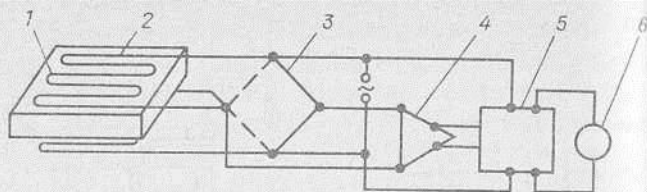


Рис. 2.16. Тепломер с термометрами сопротивления

Д. Бартоломео в работе [73] привели описание тепломера для измерения малых плотностей теплового потока $1...100 \text{ Вт/м}^2$, т.е. для большой группы естественных процессов. Вспомогательная стенка 1 (рис. 2.16) размерами $300 \times 300 \times 19 \text{ мм}$ выполнена из ячеистой фенольной пластмассы с ячейками диаметром 6 мм, заполненными стекловатой. Термометры сопротивления 2 из никелевой проволоки диаметром 0,1 мм монтируются между алюминиевой и эпоксидной пластинами толщиной 1,6 мм (на рис. показаны). Термометры включены в плечи мостика Уитстона 3. С помощью усилителя 4, синхронизирующего детектора 5 и вольтметра 6 разность сопротивлений термометров измеряется с точностью 10^{-6} . Зная сопротивление R и температурный коэффициент сопротивления α , рассчитывают плотность теплового потока q

$$q = \frac{\Delta R \cdot \delta}{\alpha R \lambda} \quad (2.1)$$

где λ и δ — теплопроводность и толщина стенки.

Этот тепломер имеет высокую чувствительность ($37,6 \text{ мВ м}^2/\text{Вт}$) и позволяет с достаточной точностью измерять плотность теплового потока до $0,08 \text{ Вт/м}^2$, но по инерционности превышает пределы Шмидта.

В качестве вспомогательной стенки может использоваться материал исследуемого объекта, при этом можно добиться полного отсутствия тепловых возмущений при измерениях, если использовать тонкие моэлектроды или термометры сопротивления и избежать контактных сопротивлений. В 1963 г. амери

американская фирма "Сайенс Продакс" рекламировала малогабаритные тепломеры со вспомогательной стенкой из любого материала по желанию заказчика, лишь бы была возможность его механической обработки [14]. В связи с тем, что тепломеры, изготовленные из различных материалов, значительно отличаются по чувствительности, каждый датчик снабжается отдельной градуировкой, по показаниям которой судят о наступлении стационарного режима.

Подобный прием был использован в 1957 г. при экспериментальном исследовании теплопереноса в почве и теплопотери от почвы к воздуху [14]. Дело в том, что поверхностные измерения температуры и тепловых потоков от почвы, имеющей комковатую структуру и покрытой растительностью, затруднены. Поэтому стремление к экстраполяции значений тепловых потоков и температур, полученных на разных глубинах в почве, к поверхностному уровню. Измерение тепловых потоков на различной глубине производили с помощью шести термисторов, которые на одинаковом расстоянии друг от друга по высоте закреплялись на бакелитовой пластине. Вспомогательной стенкой служила почва. Для измерения коэффициента теплопроводности почвы в слое между термисторами на каждый из них был навит тонкопроволочный электронагреватель. Схема коммутации была устроена так, чтобы изменения падения напряжения на каждом термисторе можно было записывать через усилитель.

Чтобы поместить такой тепломерный каркас в почву, выкапывали брус грунта вместе с растениями, вырезали его вдоль пополам и закладывали раму; щели плотно заполняли почвой, брус складывали и устанавливали на прежнее место.

Такую методику можно использовать при измерении тепловых потоков в зернохранилищах и других подобных объектах, однако для контроля состояния материала между измерительными элементами каркаса целесообразно использовать другие тепломеры, например с фиксированными вспомогательными стенками.

2.5. Использование метода вспомогательной стенки для измерения перепада температур

Тепломеры, основанные на принципе вспомогательной стенки, состоят из двух элементов: собственной стенки для создания перепада температур и термопар для измерения этого перепада. Трудности в создании этих элементов, разные возможности их в отношении рабочей температуры, большое термическое сопротивление электрической изоляции термопар, необходимость уменьшать габариты и инерционность тепломеров – все это привело к попыткам объединить функции этих элементов. Для этого можно использовать в качестве вспомогательной стенки промежуточный электрод дифференциальной термопары, изготовленный в виде диска 1 (рис. 2.17). К обеим краям диска прикрепляют тонкие пластинки 2 и соединяют их с проводниками 3. При прохождении теплового потока через такой "сэндвич" термопара вырабатывает ЭДС пропорциональную перепаду температур на диске 1, а в стационарном режиме – и плотность теплового потока через него.

Впервые подобный тепломер для сельскохозяйственных нужд (а возможно, и в мировой практике) использовал Г. Фалькенберг в 1930 г. В статье "Устройство для определения мгновенных значений интенсивности теплообмена между почвой и воздухом в различных условиях", опубликованной в журнале "Meteorologische Zeitschrift" он привел описание тепломера с использованием сплава Вуда в качестве промежуточного термоэлектрода и меди для крайних электродов и токосъема. Сплав Вуда обладает довольно высоким термоэлектрическим коэффициентом, но он зависит от температуры, что приводит к неудобству расчета \dot{q} по формуле (2.10). Кроме того, теплопроводность этого сплава значительно выше, чем у почвы.

Позднее Э. Дикон заменил материал промежуточного электрода на висмут и использовал тепломеры

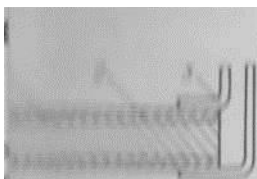


Рис. 2.17. Промысловый электрод термометра = вспомогательная стойка*

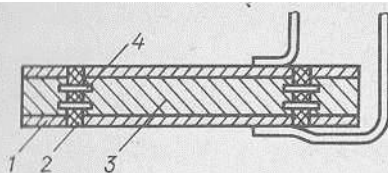


Рис. 2.18. Термомер с охран-
ным кольцом

Для исследования теплопереноса в почве [15]. Структурной особенностью термомера Дикона является выделение центральной измерительной части 1 (рис. 2.18) с помощью тонкого слоя изоляции 2 от стального кольца 3, что приближает температурное поле в измерительной части к одномерному, для которого справедлива формула (2.10). Фиксация стального кольца осуществляется с помощью крепежных винтов 4. Дикон отмечал, что калибровочные характеристики термомеров отличаются от средней величины на $\pm 30\%$, и объяснял это невозможностью получения одинаковой полуды медных пластин перед пайкой между ними висмута, однако скорее всего это связано с влиянием примесей на свойства висму-

та. Термомеры Фалькенберга и Дикона позволяли измерять тепловые потоки, усредненные на площади около 100 см^2 . Для уменьшения габаритов датчика использовались другие материалы, в частности, теллур (кристаллы с полупроводниковыми свойствами и высоким термоэлектрическим коэффициентом). При этом диаметр термомера доведен до 1–2 см. Чистый теллур меняет дважды знак термоэлектрического коэффициента в зависимости от температуры, поэтому применяли технически чистый металл (99,6...99,9%), и он существенно меняет коэффициент даже при незначительных условиях. Более стабильные характеристики имеет сплав, состоящий из двух частей теллура и одной части серебра [14], однако температурная зависимость коэффициента характерна и для него.

Этот недостаток полупроводниковых материалов значительно менее выражен у металлических термоэлектродов, поэтому они нашли довольно широкое применение для этих целей. Датчик, выполненный из металлических материалов, отличается механической прочностью, его можно крепить на различных деталях и заделывать внутрь объекта. ТермоЭДС стандартных термоэлектродных металлических материалов выражается линейной зависимостью в широком диапазоне, теплопроводность – очень слабой зависимостью, также близкой к линейной. Термическое сопротивление металлических тепломеров и инерционность невелики.

Недостатком металлических тепломеров является малый электрический сигнал, поэтому их применяют для измерения тепловых потоков большой интенсивности (свыше 10^4 Вт/м²) либо в паре с усиленными устройствами [14, 15]. Однако электрическое усиление не всегда дает достаточный эффект, в особенности если шумовые ЭДС сопоставлены с измеримыми. Поэтому отдельные тепломеры стали соединять последовательно как источники ЭДС и параллельно – как термические сопротивления. Этот принцип впервые нашел отражение в изобретении "Датчик для измерения локальных тепловых потоков" (А.с. 1590 СССР /В.Г. Федоров, О.А. Геращенко // Открытия. Изобретения. – 1963. – № 23. – С. 58); он позволяет увеличивать чувствительность тепломера пропорционально числу дифференциальных термоэлементов при незначительном увеличении термического сопротивления за счет электрической изоляции элементов от объекта. Конструктивно этот принцип первоначально был оформлен в виде так называемых галетных датчиков теплового потока, которые хорошо себя зарекомендовали при исследовании процессов теплового обмена при обработке зернистых пищевых продуктов и материалов [65].

Конструкция галетного датчика приведена на рис. 2.19. Средний слой представляет собой параллелепипед 1 из константана $2 \times 2 \times 1$ мм³. Полоска меди 2 толщиной 0,1 мм и шириной 2 мм приваривается к конденсаторной электросварочной машине к верхнему

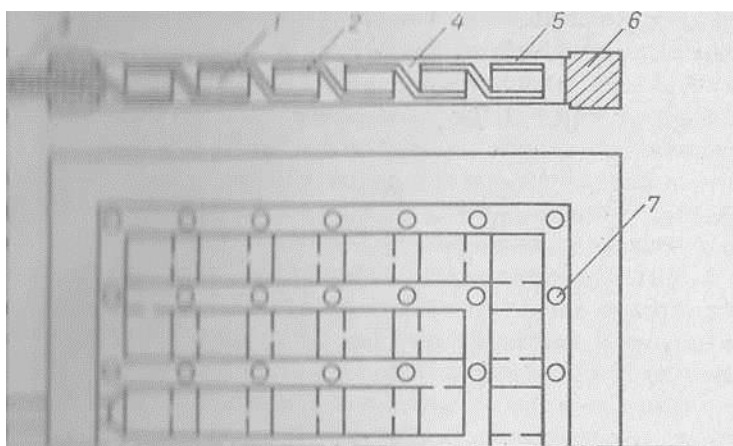


Рис. 2.10. Галетный тепломер

Для датчика-галеты, изгибается и приваривается к другой грани следующего датчика. Полоски датчиков, соединенные последовательно, укладываются в стальной кожух так, что свободные грани с перпендикулярными к ним медными токосъемными проволочками 3 оказываются рядом. Вся внутренняя поверхность кожуха и зазоры между рядами датчиков смазываются слоем слюды толщиной около 0,03 мм. Свободные полости 4 заполняются кварцевой пудрой, смешанной на термостойком лаке. После сушки и полимеризации лака кожух закрывается тонкой крышкой 5, которая приваривается к его обечайке 6. Если необходимо сделать такой тепломер проницаемым для газа, то достаточно перфорировать его отверстиями между рядами элементарных датчиков.

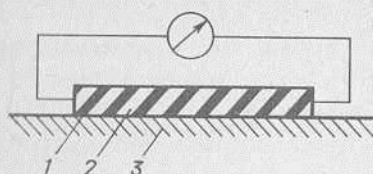
Галетные тепломеры позволили увеличить чувствительность на два порядка по сравнению с одиночными датчиками теплового потока, однако для изменений в поле они мало пригодны, поскольку нижний предел измеримой плотности теплового потока составляет 10^5 Вт/м², ВГСКБ теплофизического приборостроения (г. Санкт-Петербург) используют этот принцип для коммутации тепломеров с промежуточной стенкой из сплава висмута с сурьмой. В серийно выпускае-

мом тепломере семь элементарных датчиков с площадью поверхности около 1 см^2 и толщиной 3 мм соединены последовательно, а их сигнал выводится на цифровой прибор. Для измерения тепловых потоков в грунтах элементы заливаются в мягкую резину, так что диаметр тепломера равен 60 мм , а толщина 10 мм . Инерционность такого тепломера около 30 с, погрешность измерения $\pm 8\%$.

Малая инерционность и высокая стабильность тепломеров с металлическими термоэлектродами привели к поиску средств повышения их чувствительности. В результате была разработана новая технология изготовления и коммутации гипертермобатарей, позволяющая размещать свыше 1000 термоэлементов на 1 см^2 приемной поверхности тепломера [14, 15]. Для этого на изоляционную пленку толщиной $0,1$ – $0,2 \text{ мм}$ и шириной 1 – 2 мм навивается проволока $0,1 \text{ мм}$ из термоэлектрода, например константана. Затем с одной стороны пленку покрывают лаком, а проволоку с другой стороны – слоем парного термоэлектрода, чаще меди или серебра. Такая ленточка служит исходным материалом для тепломеров различных конструкций.

В спиральных тепломерах ленточка намотана в спираль так, что места переходов от одинарных к двойным электродам находятся поочередно на каждой из граней образующегося диска. Закрепление ленточки производится путем заливки ее эпоксидным компаундом. Заполнение диска металлом термоэлектрода для датчика не превышает величины 10% , поэтому в так называемом слоевом тепломере исходная пленка удаляется растворением, ленточка покрывается тонким слоем лака и укладывается в пресс-форму, где сжимается и заливается компаундом. Доля металла в тепломере возрастает до 30% , но увеличивается балластное термическое сопротивление между "спаями" термоэлементов и наружными контактами тепломера. Этот недостаток сведен к минимуму в решетчатых тепломерах [64], где ленточка перед заливкой компаундом укладывается в

рис. 2.20. Косослойный
тепломер



поверхности внутрь. Важным отличием решетчатых тепломеров является также возможность делать их диффузионно-проницаемыми, перфорируя сквозными отверстиями между слоями термоэлементов (отсюда и название "решчатчатые"). С помощью последних трех типов тепломеров проводятся в основном теплотристовые исследования и контроль сельскохозяйственных процессов, поэтому более подробная информация по технологии изготовления, градуировки и применения в приложении в дальнейших разделах.

На других тепломерах, в которых также используется материал дополнительной стенки для выработки ЭДС, являются косослойные тепломеры Гайлинга [14]. Основной элемент этого тепломера представляет собой пластинку из чередующихся слоев парных термоэлектрических материалов 1 и 2, расположенных под углом 45° к граням пластинки (рис. 2.20). Если такую пластинку изолировать электрически от объекта, на котором она устанавливается, и пропускать тепловой поток через нее, то разность температур на краях пластинки возбуждает ЭДС в каждой паре слоев, способную накапливаться вдоль пластины. Результирующая ЭДС, снимаемая с крайних слоев, пропорциональна Δt на гранях пластины и числу пар слоев. О.А. Герашенко провел теоретические и модельные исследования этого перспективного тепломера и установил оптимальные для основных термоэлектродных пар соотношения толщин слоев и угла наклона их свободной поверхности тепломера [8], однако радиолазная технология для изготовления таких тепломеров еще не разработана.

2.6. Измерение локальных тепловых потоков и их компонентов

Как показано в первой главе, интенсивность тепловых процессов при выращивании, хранении и перера-

ботке пищевых продуктов определяется чаще всего тремя компонентами теплового потока – за счет векции, лучеиспускания и фазовых превращений на границе объекта и теплоносителя. Векторы всех компонентов обычно направлены перпендикулярно к поверхности раздела, а знаки их могут не совпадать. При облучении солнцем грунта в утренние часы третий компонент q_{λ} направлен к поверхности грунта, а массообменный q_m (с потоком испаряющейся влаги) и конвективный q_k – от поверхности. Важно, в любом случае алгебраическая сумма компонентов дает суммарную плотность теплового потока q_c .

В работе [64] показано, что расчет "сухого" и массообменного q_m компонентов для подобных условий можно проводить по формулам

$$\left. \begin{aligned} q_c &= q_k + q_{\lambda} = \alpha(T_n - T_0) + \epsilon \sigma (T_n^4 - T_0^4) \\ q_m &= j \cdot r \end{aligned} \right\}, \quad (2.1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи конвекцией; T_n – степень черноты и абсолютная температура поверхности объекта; ϵ – постоянная Стефана-Больцмана; T_0 – температура окружающей среды; r – теплота парообразования.

Использование (2.14) позволяет с помощью небольшого числа базовых тепломеров определить три компонента плотности теплового потока q_k , q_{λ} и q_m , а также плотность потока массы j . Это равно трем. В принципе сочетание тепломеров с разными свойствами (диффузионная проницаемость, степень черноты, термическое сопротивление) может дать большое число вариантов решения. Приведенный простой из них (реализация его дает достаточно высокую точность измерения).

Три базовых тепломера (или трехсекционный мер) с одинаковыми термическими сопротивлениями $R_1 = R_2 = R_3$ располагаются на поверхности объекта в зоне, где эта поверхность имеет одинаковую температуру и равномерно омывается теплоносителем (2.21). Элементы 1 и 2 имеют нулевую диффузионную проницаемость; поток массы обходит их, элемент



Рис. 2.21. Слой изменения компонентов теплового потока

... как диффузионную проницаемость, как исходный объект. Степени черноты ϵ_1 и ϵ_3 элементов 1 и 3 одинаковы и близки к степени черноты поверхности объекта ϵ , а ϵ_2 выбирается меньшей (степень чернота). Сигналы трех тепломеров будут отличаться друг от друга, если имеют место все три компонента q_{12} , q_{L2} и q_M . Принцип работы комбинированного тепломера состоит в том, что между сигналами элементов q_1 , q_2 и q_3 и компонентами q_{12} , q_{L2} и q_M устанавливается однозначная связь. И наоборот, любой сигнал любого из элементов может быть таков

$$q_i = q_{12} + q_{L2} + q_M + \frac{\partial q_i}{\partial q_k} q_k + \frac{\partial q_i}{\partial q_L} q_L + \frac{\partial q_i}{\partial q_M} q_M; \quad (2.15)$$

... три слагаемых учитывают возможное взаимное влияние потоков энергии и массы с поверхности каждой поверхности. Первое слагаемое показывает, как может измениться q_{12} за счет того, что над секцией 1 и 2 происходит, т.е. оно относится к секциям 1 и 2. Данные по номограммам, полученным А.Р. Фертом [1] для ослабления потока лучистой энергии в паровоздушной среде, показывают, что при концентрациях ρ , актуальных для обогрева грунта, теплоотдачи растений, охлаждения, замораживания, выпечки и сушки продуктов, и малых толщинах "возмущенного" прилегающего измерительных элементов слоя среды изменения q_{12} можно пренебречь, так как оно не выходит за пределы построения самих номограмм.

Четвертое и шестое слагаемые (2.15) учитывают взаимное влияние потоков тепла и массы с поверхностями. Литературные данные по этому поводу про-

тиворечивы [64]. В некоторых работах наблюдало уменьшение коэффициента теплоотдачи за счет испарения влаги с той же поверхности, например, при даче жидкости через пористую пластину. Это уменьшение объясняли увеличением толщины пограничного за счет паров жидкости. Вместе с тем, как показал А.В. Лыков на основе анализа решения Эккерта / необходим температурный перепад не меньше 260 чтобы при испарении жидкости в ламинарный пограничный слой коэффициент теплоотдачи уменьшился на

Другие исследователи указывают на обратное влияние испарения. Наиболее вероятной причиной увеличения коэффициента теплоотдачи на 4...20% считают испарение с поверхности мелких капелек влаги, попадающих в пограничный слой, т.е. фактически растопив поверхность испарения и теплоотдачи, а не производные характеристики.

Изложенное позволяет пренебречь слагаемыми 5, 6 в (2.15) и утверждать наличие однозначной связи между сигналами секций тепломера и компонентами теплообмена. Результаты метрологической проверки этого утверждения приведены в гл. 5. Тем не менее слагаемые 4, 5, 6 в (2.15) при тепломете некоторых процессов могут быть существенными, например, при прогреве грунта или выпечке хлеба возможен случай, когда ϵ_1 может измениться за счет конденсации влаги на светлой секции, тогда нужно брать пятое слагаемое или в расчет подставлять другое значение ϵ_2 . Под ϵ_1 мы подразумеваем эффективную поглощательную способность или степень черноты (закон Кирхгофа для лучистого теплообмена той же поверхности), что имеет место в технологических процессах пищевых производств, достаточно справочно для системы "приемная поверхность тепломера - нагревающие тела" с учетом переизлучения, рассеяния и т.п. Информацию об ϵ_1 получают от тепломеров специальной градуировкой в условиях, приближенных к производственным. Подчеркнем, что в силу малой площади поверхности тепломера величина ϵ_1 обычно близка (разница не более 1%) к степени черноты поверхности.

Развернем систему уравнения (2.15) с учетом (2.14)

$$q_1 = \alpha_{1\kappa} (T_1 - T_0) + \varepsilon_1 \sigma (T_1^4 - T_0^4); \quad (2.16)$$

$$q_2 = \alpha_{2\kappa} (T_2 - T_0) + \varepsilon_2 \sigma (T_2^4 - T_0^4); \quad (2.17)$$

$$q_3 = \alpha_{3\kappa} (T_3 - T_0) + \varepsilon_3 \sigma (T_3^4 - T_0^4) + jr. \quad (2.18)$$

Для решения этой системы примем некоторые упрощения. Напомню выше по поводу влияния поперечного потока массы j и потока лучистой энергии q_{Λ} мы $\alpha_{1\kappa}$ позволили нам утверждать, что $\alpha_{1\kappa} = \alpha_{2\kappa} = \alpha_{3\kappa} = \alpha_{\kappa}$ (в гл. V это подтверждено специальными соображениями). Положим также, что температура нижней поверхности под всеми секциями одинакова. Это равносильно требованию располагать секции тепломера на одной температуровыравнивающей подложке с температурой T (рис. 2.21). Наконец, положив искусственным образом $T_1 = T_2 = T_3$, получим упрощенное решение системы (2.16)...(2.18) с учетом того, что в этом случае

$$q_{\Lambda} = \frac{\delta}{\varepsilon_1} q_{\Lambda 1}$$

$$q_{\Lambda} = \varepsilon \frac{q_1 - q_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}; \quad (2.19)$$

$$q_{\Lambda} = q_1 - \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon} q_{\Lambda}; \quad (2.20)$$

$$q_{\Lambda} = q_3 - q_1. \quad (2.21)$$

В действительности по схеме (рис. 2.21) $T_1 \neq T_2 \neq T_3$ для точного определения компонентов q это обстоятельство можно учесть в виде поправок. Начнем с поправки теплового потока излучением q_{Λ} , которую с учетом поправки δq_{Λ} нужно определять как

$$q_{\Lambda} = \varepsilon \frac{q_1 - q_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} (1 \pm \frac{\delta q_{\Lambda}}{q_{\Lambda}}). \quad (2.22)$$

Разные в температурах T_1 и T_2 можно выразить, указав для однозначности, что объект отдает тепло,

$$T_2 - T_1 = (q_1 - q_2) R. \quad (2.19)$$

Истинное значение $q = \epsilon \sigma (T_n^4 - T_0^4)$ отличается от рассчитанного по (2.19) из-за неравенства T_1 и T_2 . Температуры T_1 и T_2 близки к T_n , поэтому расчет поправки δq_{1n}

$$\delta q_{1n} = \frac{(T_2 - T_1) \frac{\partial q_1}{\partial T}}{q_{1n}} \quad (2.20)$$

можно производную от q_{1n} брать по любой из температур (T_1 , T_2 или T_n), для простоты результатов возьмем T_n

$$\frac{\partial q_{1n}}{\partial T_n} = \frac{\partial}{\partial T_n} [\epsilon \sigma (T_n^4 - T_0^4)] = 4 \epsilon \sigma T_n^3 \quad (2.21)$$

Как показал опыт практического использования метода, поправка δq_{1n} для расчетов сложного массообмена, происходящего при обработке различных объектов, не превышает нескольких процентов от q_{1n} , поэтому в знаменателе (2.24) поставим не точное, а приближенное значение q_{1n} (2.19). Как и при решении уравнения (2.25), это приведет к появлению погрешности второго порядка малости по сравнению с поправкой (2.25). Учитывая (2.23) и производя необходимые преобразования и сокращения, получим

$$\delta q_{1n} = 4 \sigma R (\epsilon_1 - \epsilon_2) T_4^3 \quad (2.22)$$

Аналогичным образом определим поправку к обменной составляющей $q_M = (q_3 - q_1)(1 \pm \delta q_M)$, в этом случае сравниваем показания секций 1 и 3, а T_1 отличается от T_3 и T_n за счет того, что $q_1 \neq q_3$, следовательно, δq_M связана с возможным искажением в сигнале первой секции q_1

$$\delta q_M = \frac{T_1 - T_3}{q_1} \cdot \frac{\partial q_1}{\partial T_1}, \quad (2.23)$$

поставив, что $(q_3 - q_1)K = I_1 - I_3$ и дифференцируя (2.27) по T_1 получим

$$\delta q_M = \frac{(q_3 - q_1)R(\alpha_K + 4\epsilon\sigma T_1^3)}{\alpha_K(T_1 - T_B) + \epsilon\sigma(T_1^4 - T_B^4)} \quad (2.28)$$

Примем, что "сухой" теплообмен происходит главным образом за счет q_K , а q_1 можно учесть увеличением α на величину α_1 . Тогда можно записать $\alpha = \alpha_1(T_1 - T_B)$ и поправка (2.28) упрощается

$$\delta q_M = \frac{q_3 - q_1}{T_1 - T_B} R \quad (2.29)$$

Определим знак поправок (2.26) и (2.19). Уравнение (2.19) получено в предположении $T_1 = T_2$. Рассмотрим случай отвода тепла с поверхности объекта. На "светлой" секции 2 (рис. 2.21) перепад температур меньше, поэтому фактически $T_2 > T_1$. Значит, на светлой секции уходит относительно больше тепла (по сравнению), чем при $T_1 = T_2 = T_n$. Следовательно, в этом случае получаем разность $(q_1 - q_2)$ заниженной, величину q_1 по формуле (2.19) тоже заниженную, поправку (2.26) необходимо прибавлять - при отводе тепла поправка положительна.

При подводе тепла $T_2 < T_1$ (перепад на светлой секции снова меньше). К секции 2, в соответствии с законом Стефана-Больцмана, приходит больше тепла излучением, чем при $T_1 = T_2$. И в этом случае получаем разность $(q_1 - q_2)$ заниженной, поправку (2.26) снова нужно прибавлять.

Для определения знака поправки (2.29) примем за положительное направление векторов теплового потока q_1 и q_3 , совпадающее с направлением вектора потока массы j , поскольку последний не меняет знака в случае конденсации влаги на поверхности объекта (здесь 1 и 3 тепломера показывают одинаковые значения теплового потока).

При положительном q_1 (охлаждение, замораживание грунта или продукта) $q_1 < q_3 : T_1 > T_3$, следовательно, $q_M > q_3 - q_1$ - поправка в этом случае положительна.

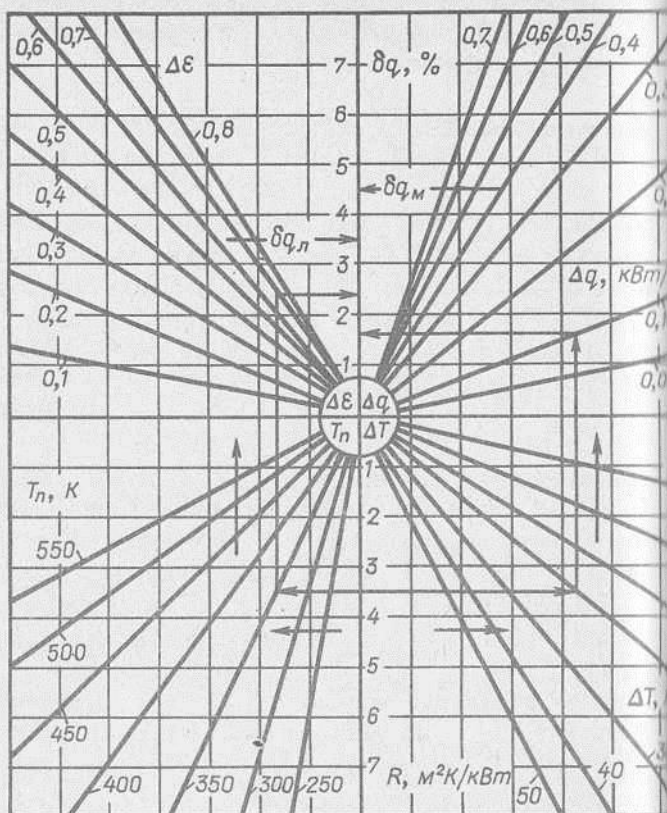


Рис. 2.22. Номограмма поправок при расчете компонентов теплового потока

При отрицательном q_1 (конвективная сушка) $T_1 > T_3$, но $q_m < q_3 - q_1$ (над секцией 1 температурный перепад $T_3 - T_1$ меньше, чем над секцией 2 продуктом), следовательно, поправку нужно отнять от $q_3 - q_1$. Но поскольку в данном случае она имеет отрицательное значение, так как $T_3 > T_1$, ее снова надо добавлять к $q_3 - q_1$. В результате получаем расчетные формулы

$$q_{\lambda} = \varepsilon \frac{q_1 - q_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \left[1 + 4GR(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) T_n^3 \right]; \quad (2.)$$

$$q_n = (q_3 - q_1) \left(1 + \frac{q_3 - q_1 R}{T_1 - T_8} \right); \quad (2.31)$$

$$q_n = q_1 - \frac{\delta_1}{\epsilon} q_n. \quad (2.32)$$

Для удобства пользования формулами (2.30) и (2.31) поправки (2.26) и (2.29) номографированы. Существенная функциональная зависимость переменных позволяет построить каждую из них в двух сопряженных аппаратах, а наличие общей переменной R совместить обе номограммы (рис. 2.22).

Практическое использование этой номограммы показывает, что в процессе, например, прогрева грунта на контактной холодильной обработке пищевых продуктов поправки δq_n и δq_m слабо изменяются и составляют величины порядка 0,2% и 1%. Интересно отметить, что δq_m не растет с уменьшением $T_1 - T_8$ к концу процесса, хотя T_1 при этом и стремится к

Причина — в неразрывной связи интенсивности теплообмена, приводящей к уменьшению $(q_3 - q_1)$ (2.29), с интенсивностью теплообмена, падающей в результате снижения $(T_1 - T_8)$.

При тендовой обработке продуктов, например выпечки, поправка δq_n может увеличиваться от 1 до 3%, а при снижении нужно брать базовые тепломеры с возможно меньшим R . Тогда, как и при холодильной обработке, можно пользоваться упрощенными формулами (2.19)...(2.21). Необходимость постоянного пользования номограммой возникает при раздельном определении конвективной и лучистой составляющих теплового потока от греющих поверхностей печей и подобных аппаратов.

2.7. Технология изготовления и расчет тепломеров

Широкий диапазон потоков тепла при обработке грунтов и различных продуктов, а также их эффективная ТЭХ потребовал разработки базовых тепломеров,

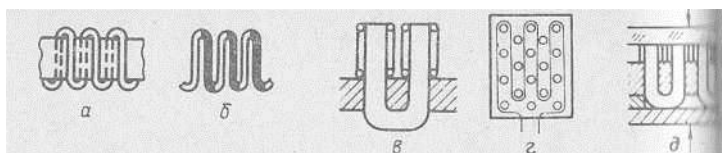


Рис. 2.23. Последовательность изготовления решетчатых тепломеров

параметры которых можно было бы варьировать по одинаковой технологии изготовления. Такая технология разработана и внедрена в Киевском технологическом институте пищевой промышленности [64]. В качестве общего названия для новых тепломеров и термоэлементах представляется подходящим термином "решетчатый" (см. 2.5).

Исходным материалом для изготовления решетчатых (как и для слоистых и спиральных элементов) является спираль-ленточка (рис. 2.23,а) дифференциальных термоэлементов высотой 0,8...3,0 мм из танталовой проволоки диаметром 0,07...0,10 мм, навитая на целлулоидную полосу и покрытая с одной стороны слоем меди толщиной 3,0...3,5 мкм. Чтобы сделать ленточку плоской (рис. 2.23,б), ее прокатывают между резиновыми вальцами после растворения целлулоидной основы. Затем ленточка укладывается между фторопластовыми стержнями, закрепленными на нужном шаге на плоском основании (рис. 2.23,в). Для обеспечения снятия готового базового элемента на те же стержни предварительно надевается фторопластовая пластинка толщиной 3 мм.

Укладка ленточки производится заданными фигурами (обычно петлями) с малым натяжением вокруг стержней, чтобы обеспечить вертикальное расположение термоэлементов (рис. 2.23,г); к концам ленточки припаиваются медные гибкие токосъемные проводники во фторопластовой изоляции. Затем накладывается одна фторопластовая пластина с толщиной, равной высоте базового элемента, в которой сделано отверстие размерами будущего элемента, и образовавшаяся полость заливают эпоксидным компаундом с нужным наполнителем, накрывают стеклом с антиадгезионным покрытием

Этот элемент конструктивно зажимают в пресс (рис. 2,23,д). После полимеризации компаунда, которую проводят в вакуумной камере, и удаления стекла заготовку снимают со стержней, воздействуя на фторопластовую пластину.

Готовый элемент представляет собой решетчатую конструкцию с равномерно расположенными отверстиями. Для изготовления диффузионно непроницаемых секций тепломера отверстия заливают тем же эпоксиэпоксидным компаундом, а элемент повторно зажимают в пресс. Затем эти секции можно использовать для выделения лучистого компонента q_{λ} , наклеивая на них пленку с заданной степенью черноты.

Описанная технология позволяет получать базовый датчик с минимальным защитным слоем (п. 2.4.2), когда его толщина практически до нуля, а эффективная теплопроводность λ_g — от 10^{-1} до 10^1 Вт/(м·К). Таким образом, возможность прогнозировать λ_g , что реализовано при выборе тепломера для конкретного объекта, в работе [64] решена задача о прохождении тепловой энергии через последовательно-параллельное соединение слоев обонх термоэлектродов 1 и 2 (рис. 2,24) с теплопроводностями λ_1 , λ_2 и λ_3 , и сечениями f_1 , f_2 и f_3 . Если толщина тепломера составляет h , толщина защитного слоя компаунда — α . Если датчик диффузионно непроницаем, то в f_3 следует включить и сечение ваннапиров.

В результате получено выражение для эффективной теплопроводности датчика λ_g , т.е. эквивалентной теплопроводности пластины толщиной h , при прохождении через которую тепловой поток плотностью q соответствует падению температуры на ней Δt

$$\lambda_g = h \left(\frac{2\alpha}{\lambda_3} + \frac{(h-2\alpha)(2f_1 + f_2 + f_3)}{2\lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2 + \lambda_3 f_3} \right)^{-1}. \quad (2.33)$$

Таким образом, теплопроводность датчика является функцией восьми параметров

$$\lambda_g = f(h, \alpha, f_1, f_2, f_3, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3),$$

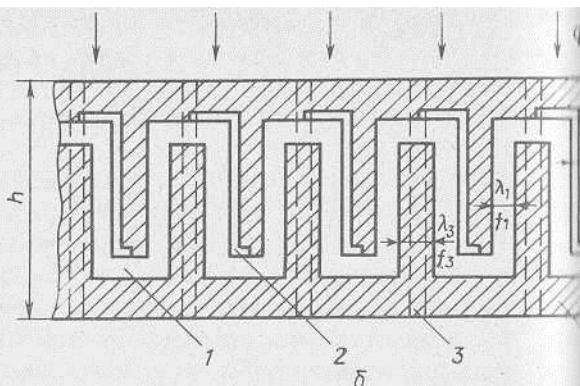


Рис. 2.24. К расчету эффективной теплопроводности
решетчатого тепломера

причем функция эта нераздельная, что видно из (2.33).

Пользование формулой (2.33) усложняется еще и потому, что отдельные параметры в ней связаны дополнительно между собой. Так, для получения максимальной чувствительности датчика, соотношение f_3/δ должно быть оптимальным. Вопросы оптимизации ванапокрытия рассмотрены в работах О.А. Герашин [8], для случая потенциометрической схемы измерения сигнала датчика это соотношение составляет

$$\left(\frac{f_2}{f_1}\right)_{opt} = \left[\frac{\rho_2 \lambda_1}{\rho_2 \lambda_2} \left(2 + \frac{\lambda_3 f_3}{\lambda_1 f_1} \right) \right]^{1/2}. \quad (2.34)$$

Использование выражения (2.34) приводит к введению еще двух параметров: удельных электрических сопротивлений основного и дополнительного термоэлектродов ρ_1 и ρ_2 .

Для выработки практических рекомендаций по выбору λ_2 наиболее близкого к теплопроводности материала, животного, продукта или стенки аппарата предложено упрощение уравнения (2.33). Примем значения некоторых параметров тепломеров, изготовляемых по описанной выше технологии. В качестве основного термоэлектрода в них используется константановый провод диаметром 100 мкм ($f_1 = 7,85 \cdot 10^{-9}$

$2,8 \text{ Нг/м}^2\text{К}$), в качестве покрытия - медь ($\lambda_3 = 0,017$). Толщину f_2 получим из (2.34) для слухового датчика датчика эпоксидной смолой с $\lambda_3 = 0,3$ ($\lambda_3 = 10^{-9}$ Омсм; $\rho_2 = 0,018 \cdot 10^{-6}$) последовательности приближенными в связи с наличием неизвестной f_1 . В соответствии с рекомендациями [8], уменьшаем полученное значение f_2 отп. на 50%. Окончательно получим $f_2 = 1,1 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$, что соответствует толщине покрытия 3,5 мкм.

Прямое такое расстояние между "спаями" (толщина звукового слоя датчика) $h - 2\mathcal{E}$ равным 1,2 мм. Эта величина складывается из высоты унифицированной фольги целлулоида (1 мм), на которую наматывается константановый проводник, и двух толщин этого проводника.

В качестве характеристики плотности укладки термосопротивов в датчике примем число элементов на единицу площади принимающей поверхности датчика (на единицу площади - на 1 см^2)

$$n = \frac{10^{-4}}{2f_1 + f_2 + f_3}, \text{ см}^{-2}. \quad (2.35)$$

Эта характеристика однозначно связана с формфактором Φ , введенным О.А. Герашенко при разработке теории планарных батарейных датчиков [8],

$$\Phi = \frac{2f_1 + f_2 + f_3}{f_1} = \frac{10^{-4}}{hf_1}, \quad (2.36)$$

что представляется более удобной для практической работы с датчиками, например в качестве паспортного параметра.

Теперь уравнение (2.33) упрощается

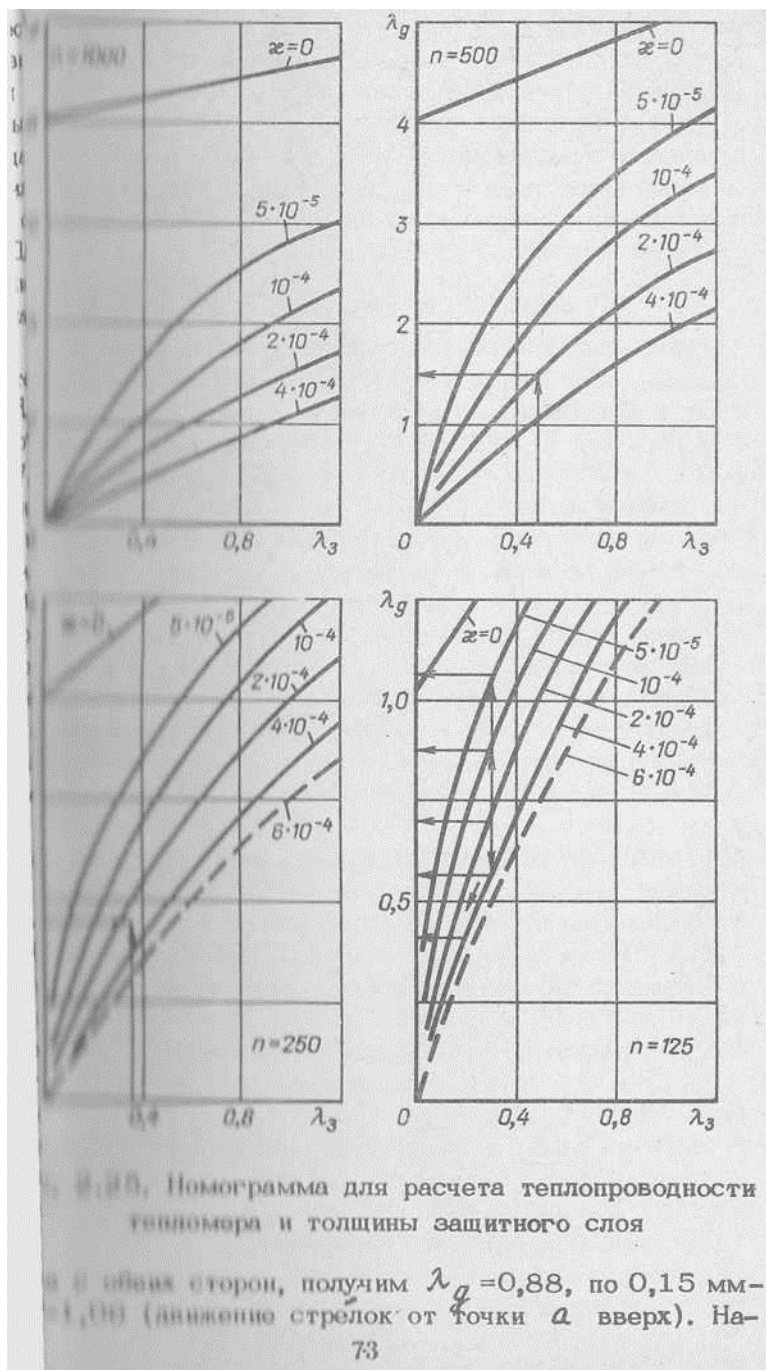
$$\lambda_p = \frac{1,2 \cdot 10^{-3} + 2\mathcal{E}}{\lambda_3 + \frac{1,2}{0,11h + 10^3 \lambda_3} - 0,168h \lambda_3}. \quad (2.37)$$

Число параметров сокращено до трех ($\mathcal{E}, h, \lambda_3$), функция λ_p по-прежнему не разделяется. Анализ влияния каждого параметра затруднителен, поэтому

необходимо представить уравнение (2.37) графиче-
 Сократить число параметров до двух можно в свя-
 тем, что h является величиной дискретной. При
 плотной навивке и укладке термоэлементов в данн
 условиях ($h \approx 1000$) вариации чувствительности д
 чика производятся путем уменьшения h в 2, 4 и
 8 раз. Полагая $h = 1000; 500; 250$ и 125 , мы
 ставили номограммы $\lambda_d = F(\lambda_z, x)$ (рис. 2.25).
 сохранения минимальной погрешности в пользовани
 номограммами при каждом уменьшении h вдвое м
 штаб λ_d увеличивали также вдвое.

Линии $x = 0$ на номограммах соответствуют т
 ретически возможному максимальному значению λ
 при данной плотности укладки. Увеличение h до
 2000 дало бы возможность приблизить λ к 16-17
 т.е. к теплопроводности некоторых сплавов, приме
 мых для изготовления технологических аппаратов (с
 жавеющие стали). Однако, как видно из номограмм
 наличие охранного слоя всего в 0,05 мм толщиной
 приводит к резкому падению λ_d , в особенности при
 густой укладке термоэлементов и малых λ_z . Поэто
 практически для металлических стенок применяются
 лишь металлические одиночные тепломеры, причем
 крепиться на стенке они должны пайкой или сварк
 так как наличие любого клея вызывает тот же эфф
 резкого падения λ_d .

С помощью номограммы можно определить λ_d п
 вого тепломассомера, измерив его общую толщину
 ($1,2 \cdot 10^{-3} + 2x$) и зная материал заполнителя λ
 (пример показан стрелками на номограмме $h = 5$)
 либо изготавливать датчики с заранее заданными св
 ствами (пример на номограмме $h = 250$). Имеются
 также некоторые возможности изменения λ_d потр
 бителем как в сторону повышения, так и в сторону
 понижения. Для увеличения λ_d необходимо снять ч
 охранного слоя с обеих или с одной стороны датчи
 для снижения - нарастить этот слой. Рассмотрим
 ленный пример на номограмме $h = 125$. При испо
 зовании в качестве заполнителя эпоксидной смолы
 $\lambda_z = 0,3$ получаем датчик с $\lambda_d = 0,7$, если толщин
 охранного слоя 0,2 мм (точка a). Сняв по 0,1 мм



раствив по 0,2 мм слоя той же смолы, получим $\lambda_g = 0,56$; при $\lambda_z = 0,2$ – соответственно $\lambda_g = 0,2$ (движение стрелок вниз и влево).

Общее правило подбора теплопроводности датчика состоит в том, чтобы ее значение было равно или сколько выше, чем у продукта либо у стенки аппарата, при этом погрешность за счет привнесения датчика будет минимальной (см. гл. 5).

2.8. Конструктивные разработки тепломеров

Описанная (2.7) технология позволяет получать базовые тепломеры с практически одинаковыми р-чими коэффициентами (плотность теплового потока Вт/м^2 , при прохождении которой вырабатывается сигнал в 1 мВ) и одинаковыми термическими сопротивлениями. Это облегчает подбор секций для двух- и многосекционных тепломассомеров и их точное дифференциальное включение для более точного измерения Δq в уравнения поправок (см. 2.6).

Как правило, размеры секций в одной тепломере одинаковы, но в отдельных случаях их целесообразно выбирать разными при одинаковой толщине, которая определяет величину термического сопротивления. Других размера – ширина и длина – определяют р-чий коэффициент секции. Иногда удобнее, например, увеличивать размеры светлой секции по сравнению с темной, чтобы получить примерно одинаковые сигналы в процессе исследования лучисто-конвективного теплообмена. Можно увеличивать и размер приращенной секции, если испарение будет происходить непосредственно из ее каналов, для увеличения сигнала за счет q_m . Добавочные (свыше трех) секции могут устанавливаться для контроля равномерности j по поверхности исследуемого продукта: их размеры меньше, чем у основных секций.

Обычно двух- и трехсекционные модели изготавливаются из базовых элементов размерами 10x12, 14x17, 17x20, 22x30 мм при одинаковой толщине (1,2 мм). При монтаже в тепломер секции устанавливаются в прямоугольник длинными сторонами друг к другу (рис. 2.26), зазоры между секциями в

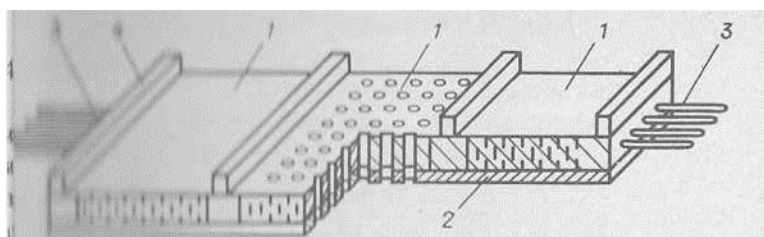


Рис. 2.20. Комбинированный тепломер

заполняется эпоксидной смолой. Одновременно заливаются отверстия сплошных секций.

При выводе формул для расчета лучистой, массообменной и конвективной составляющих тепломассообмена мы привели, что температура нижней поверхности всех секций тепломассомера одинакова. Для выполнения этого требования секции монтируются на общей температуровыравнивающей подложке 2 из меди или латуны толщиной 0,1...0,3 мм.

В подложке закрепляется спай медь-константановой термопары для контроля температуры секций. Токены в первичных преобразователях секций и с термометра организуется с помощью многожильных гибких соединителей 3 во фторопластовой изоляции с наружным диаметром не более 1 мм, через короткие стороны теплообменника. Перфорацию подложки можно производить только под массообменной секцией. Если тепломассомеры предназначены для закладки под пористый слой продукта или материала, то между секциями выделываются перегородки 4 из теплового изоляционного материала с высотой, равной толщине поверхностного слоя, и толщиной 1-2 мм для предотвращения взаимного влияния тепломассообмена над смежными секциями.

Тепломеры можно использовать для решения сопряженных задач тепломассопереноса, измеряя компоненты теплового потока внутри объекта и на границе с окружающей средой.

Для комплексных исследований необходимо выбрать объект, в котором перенос тепла и массы является определяющим по всей его толщине. Если выбор такого

образца затруднен, то можно его формировать с помощью адиабатических оболочек для боковых поверхностей, например сосудов Дьюара.

На поверхности образца располагаются трех- или двухсекционный тепломер (рис. 2.27); если лучистый теплообмен неактуален, под ним на заданном расстоянии друг от друга – решетчатые базовые элементы. Все элементы связываются между собой помощью координатника, который может быть раздвижным, если образец меняет объем в процессе обработки. Измерение расстояния между измерительными элементами непрерывно фиксируется на ленте самопишущего моста, сигналы на него подаются от реохорда соединенного с телескопическими втулками координатника подвижными контактами.

При исследовании продуктов нежной консистенции например кондитерских изделий, устройство может быть дополнено системой разгрузки воздействием измерительных элементов на изделие – противовесом B с массой, равной массе элемента и втулки.

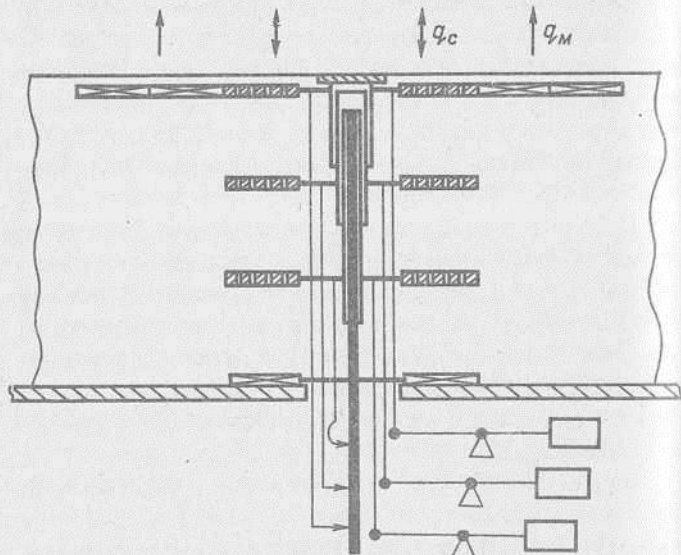


Рис. 2.27. Устройство для исследования сопряженного тепло-массопереноса

3. МЕТОДЫ БЕСКОНТАКТНОЙ ТЕПЛОМЕТРИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

3.1. Классификация приемников теплового излучения и их краткая характеристика

В сельском хозяйстве, медицине и биологии измерение потоков излучения позволяет переходить от качественного характера диагностической информации к секретному количественному. Надежность информации о тепловом и температурном состоянии объекта точном счете определяется технико-эксплуатационными характеристиками измерительной аппаратуры. Широкий диапазон применимости вызвал разработку многочисленных приборов для измерения мощности потоков излучения. Настоящий обзор предлагает классификацию приемников для измерения потоков теплового излучения с целью проведения анализа их характеристик. Выбор приемника для конкретной задачи измерения состоит из нескольких моментов, обусловленных природой теплового излучения. Измеряемый поток, падая на приемную поверхность прибора, частично отражается ею, а частично поглощается и превращается в тепло. Доля поглощенной энергии должна по возможности быть близкой к единице и, во всяком случае, известной заранее. Кроме того, поглощение должно быть достаточно равномерным во всем диапазоне длин волн измеряемого излучения. Обеспечение перечисленных свойств лучевоспринимающей поверхности является первым условием при разработке теплометрического приемника. Второе условие заключается в выборе типа чувствительного элемента прибора, задачей которого является преобразование тепловой энергии в другую ее форму, удобную для измерения. В этих условиях, энергия, преобразованная чувствительным элементом, должна быть приведена в соответствие с измеряемым потоком излучения, что достигается при помощи градуировки и метрологической аттестации прибора. Приемники излучения описываются параметрами, определяющими их основные свойства, которые

характеризуют возможность их использования для конкретной задачи измерения. Основными параметрами тепловых приемников являются: чувствительность, постоянная времени, пороговый поток, обнаружительная способность. Чувствительностью (коэффициентом преобразования) приемника называют отношение изменения значения измеряемого электрического сигнала под действием падающего на приемник излучения к значению падающего на него потока излучения в рабочих условиях. Постоянная времени приемника измеряется как интервал времени после прекращения воздействия излучения на приемник, в течение которого сигнал уменьшается в ζ раз, или интервал времени с начала воздействия излучения до момента, когда нарастающее напряжение достигнет значения, равного $(1 - \zeta^{-1})$ от своего максимального значения.

Пороговый поток (эквивалентная мощность шума приемника определяется таким значением потока излучения, который вызывает в приемнике сигнал, равное среднеквадратичному значению шума в заданной полосе частот. Так как приемники одного и того же класса с разными размерами чувствительного элемента отличаются значениями пороговых потоков, их нормируют, приводя к единичной площади элемента. Пороговый поток приемника в единичной полосе частот, приведенный к единичному по площади чувствительному элементу, называют удельным пороговым потоком (размерность $\text{Вт} \cdot \text{см}^{-1} \text{ Гц}^{-0,5}$).

Величину, обратную пороговому потоку, называют обнаружительной способностью, а обратную удельную пороговому потоку – удельной обнаружительной способностью (размерность $\text{см} \cdot \text{Гц}^{0,5} \cdot \text{Вт}^{-1}$).

Кроме того, приемник паспортизируется по геометрическим размерам чувствительного элемента и электрическому сопротивлению [57]. Ниже приведен анализ приемников теплового излучения, выполненный в уже ставшей традиционной классификации электрическому принципу, положенному в основу измерения [8].

Эвапорографические приемники излучения. Метод эвапорографии заключается в получении теплового изображения объекта на поверхности термочувствительной пленки. Впервые эвапорографический метод описан Черни, который, в свою очередь, ссылается на Гершеля, получившего видимое изображение картинок в инфракрасных лучах путем экспонирования ее на фильтровальную бумагу, пропитанную этиловым спиртом. Контрастность изображения получена благодаря большей скорости испарения пленки с более теплых мест [8].

Пневматические приемники излучения. В основу пневматических приемников излучения положены дифференциальные газовые термометры. Благодаря высокой чувствительности и неселективности приемники этого типа получили распространение. Широко известен приемник [8], в котором роль чувствительного элемента выполняют две газовые полости, разделенные приемной мембраной. Измеряемое излучение проходит через галлитовое окно, поглощается черным покрытием мембраны, нагревает ее и газ, заключенный в приемной камере. Расширяясь, газ вызывает прогиб мембраны, что регистрируется при помощи гибкой трубки. В приемниках Сивкова и Гуда [8] фиксируется изменение электрического сопротивления именно под действием деформации. В современном улучшенном приемнике гибкая мембрана является одновременно пластиной конденсатора. Регистрация нагрева определяется по электрическому сигналу, обусловленному изменением емкости конденсатора при перемещении взаимного положения его пластин. Обнаружившая способность этого прибора достигает 10^{-11} см \cdot Гц 0,5 \cdot Вт $^{-1}$ при постоянной времени до 10 мс [8].

Дилатометрические приемники излучения. Принцип действия дилатометрических приемников заключается в использовании термического расширения твердых тел. Чувствительный элемент современного дилатометра состоит из двух взаимозаменяемых черных сенсорных пластинок. Пластинки разделены тонкой по-

лоской слюды. Под воздействием поглощенной энергии облучаемая пластина обогрывается, вызывая прогиб элемента, величина которого регистрируется оптической системой. Через нижнюю пластинку пропускается электрический ток такой величины, что температуры пластин выравниваются. При этом нить возвращается в первоначальное положение. Подведенная электрическая мощность отождествляется с измеряемым потоком [8].

Энтальпийные приемники излучения. Энтальпийные называются приборы, в которых приемная поверхность интенсивно охлаждается рабочим телом. Измерение поглощенной теплоты производится путем определения изменения теплосодержания хладагента. Повышение теплосодержания может происходить как с изменением агрегатного состояния, так и без фазовых переходов рабочего тела. В приборе Беллани используется испарение жидкости, содержащейся в резервуаре и нагреваемой за счет поглощенной лучистой энергии. Для устранения погрешности, связанной с теплопотерями, пирометр выполняется с двумя элементами: черным и белым. Объем жидкости в первом пропорционален поглощенной энергии (плюс теплопотери), во втором — только теплопотерям [8].

Для измерения энергий высокой плотности используются водоструйные приборы, выполненные в виде двух конических плоскостей, между которыми циркулирует вода. Рабочей характеристикой служит зависимость между поглощенной потоком энергией и ростом температуры воды. Градуировка производится методом замещения лучистого обогрева электрическим током.

Пирозлектрические приемники излучения. При работе пирозлектрических приемников основывается на температурном изменении поляризации пирозлектрического кристалла под действием потока излучения. Пирозлектрический коэффициент $\delta = dP/dT$, являющийся основным параметром приемников данного типа, представляет собой сложную функцию ряда процессов. Физически измеряется суммарный пирозлектрический коэффициент. При этом существенно знать температурный интервал, в котором δ изменяется не более

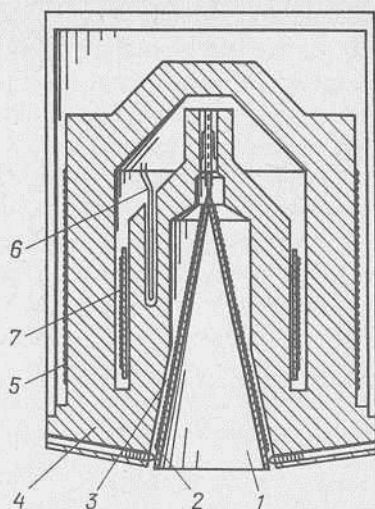
142 %. Этот интервал характеризует динамический диапазон измерения приемника. Так как вольт-ваттная чувствительность пироэлектрических преобразователей зависит от схемы включения и величины нагрузочного сопротивления, целесообразно ввести ампер-ваттную чувствительность $S_a = I_a/W$. Величина I_0 является сложной функцией физических характеристик кристалла, геометрических размеров, условий теплообмена кристалла с окружающей средой и частоты модуляции радиационного потока. Пироэлектрический ток I_0 определяется под действием двух основных факторов — величины среднего прироста температуры чувствительного элемента и скорости изменения прироста. Средний прирост температуры (как у любого теплового приемника) обратно пропорционален частоте модуляции, а скорость его изменения прямо пропорциональна амплитуде. Действие этих двух факторов уравнивается в некотором частотном интервале. В этом заключается преимущество малой инерционности пироэлектрических приемников по сравнению с другими. Значения $\tau_{0,63}$ составляют $10^{-5} + 10^{-6}$ с, могут быть достигнуты значения 10^{-8} с. К достоинствам пироэлектрических приемников следует отнести то, что их порог чувствительности мало зависит от величины приемной площади. Использование пироэлектрических приемников позволяет регистрировать температурные изменения со скоростью $10^{-7} + 10^{-8}$ с при чувствительности $1 \text{ В}/^\circ\text{C}$ [57].

Резистометрические приемники излучения. Принцип действия прибора основан на изменении электрического сопротивления материала под воздействием падающего на него излучения. Такие приемники еще называют болометрами. Изменение сопротивления болометра $\Delta R/R = \beta \Delta T$, где β — температурный коэффициент сопротивления, значение которого определяется материалом и температурой болометра. Для большинства металлов $\beta = 1/T$, для полупроводников $\beta = 1000/T^2$. В современных болометрах используют материалы, имеющие температурный коэффициент порядка $0,5 \text{ \%}/^\circ\text{C}$, полупроводники с ТКС — более $4 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ и сверхпроводники, ТКС которых в переходном состоянии 1500 К

нии от нормального к сверхпроводящему достигает 5 000 % /°С [30]. Конструктивно болометры выполняются в виде металлических навитых проволок, напыленных пленок из меди, вольфрама, платины, золота. Полупроводниковые – сплавки из окислов никеля, кобальта, марганца. В сверхпроводниковых болометрах используются полоски из тантала, нитрида кобальта, нитрида ниобия, работающих при криогенных температурах. Поиски более совершенных материалов для глубокоохлаждаемых болометров привели к созданию приемных элементов из стекла кварцевого рода. Пластина толщиной 100 мкм подвешивается в вакууме. Излучение подводится через световод диаметром 12 мм из нержавеющей стали. Система помещается в сосуд с гелием [24].

Примером методического и конструктивного совершенства могут служить радиометры Кенделла [4]. Один из приборов изображен на рис. 3.1. Измеряемый поток излучения попадает в изотермическую полость ловушки 1, подвешенную на теплоизоляторах 2 и внутри оболочки 4, термостатируемой регулируемым электронагревом. Чувствительный элемент прибора – платиновый термометр сопротивления, навитый на наружную поверхность ловушки, – служит одновременно нагревателем, поддерживающим температуру ловушки равной температуре оболочки. Для этого резистивные оболочки включены в смежные плечи мостового устройства. Так как теплообмен с окружением отсутствует, то измеряемый поток излучения q находится из соотношения $q = \epsilon \sigma T^4 - P$, где T – температура полости, ϵ – поверхностная плотность электрической мощности при термостатировании оболочки. При отсутствии измеряемого потока мощность P тождественна собственной мощности излучения полости. В режиме измерения мощности, необходимая для поддержания температурного равновесия, уменьшается на величину, равную измеряемой мощности. Таким образом, мерой лучистого потока служит изменение электрической мощности. Радиометр используется в США как образцовое средство для измерения потоков до $4 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$ в диапазоне волн 0,2–4,0 мкм.

3.1. Приемник
Кенделла



Приемники с термоэлектрическими чувствительными элементами. Принцип действия термоэлектрического преобразователя основан на эффекте Зеебека, заключающемся в том, что в цепи, состоящей из двух соединенных материалов, при нагревании места спая возникает электродвижущая сила. При наличии градиента температуры вдоль проводника электроны с горячего конца диффундируют в направлении, обратном температурному градиенту, так как их энергия и скорость выше, чем на холодном конце. В результате на холодном конце возникает отрицательный заряд, а на горячем — положительный. В полупроводниках это явление выражено сильнее, так как ЭДС электронного и дырочного полупроводников складываются. При подборе пар термоэлементов используется величина удельной термоЭДС, которая представляет собой ЭДС, возникающую при единичном температурном перепаде $\alpha_T \Delta T$, где ϵ — термоЭДС, возникающая при перепаде спаев до температуры ΔT , α_T — удельная термоЭДС, численно равная разности потенциалов, соответствующей разности температур горячего и холодного спаев в 1 К. Удельная термоЭДС металлических термоэлементов достигает 10 мкВ/К, у полупроводников — ее значение на порядок или несколько порядков

выше. Металлические термоэлементы изготавливаются из меди, никеля, висмута, платины, кобальта, алюминия, тантала, серебра, висмута, железа, константана и других. Полупроводниковые — из кремния, теллура, селена, сурьмы.

Без учета эффекта Пельтье, интегральная вольт-ваттная чувствительность термоэлемента $S = \alpha_T a_T \sigma_T^{-1}$, где α_T — интегральный коэффициент поглощения приемной поверхности элемента, σ_T — полная термическая проводимость спая в $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$. Интегральная вольт-ваттная чувствительность металлических термоэлементов изменяется в пределах от 3 до 5 $\text{В} \cdot \text{Вт}^{-1}$, чувствительность полупроводников — от 30 до 50 $\text{В} \cdot \text{Вт}^{-1}$. Постоянная времени металлических составляет 0,1–2,0 с, полупроводниковых — от 0,04 до 0,10 [577].

Простейший радиационный термоэлемент изображен на рис. 3.2. В лучшем варианте исполнения, отличающемся высокой чувствительностью и быстрой реакцией, он представляет собой пластину 1 из золотой фольги толщиной 0,5 мкм, черненую со стороны, воспринимающей излучение. К ней присоединены термоэлектроды из висмута–сурьмы или медьконстантана, имеющие длину 3–4 мм и диаметр 2 мкм. Свободные концы электродов контактируют с довольно массивными металлическими штырями 3 и держателем 4, обеспечивающим постоянство температуры холодного спая термопары. Для устранения утечек теплоты элемент монтируется в корпусе на тонких кварцевых нитях [577].

Своеобразный быстродействующий термоэлемент построен на проволоке Тейлора — стеклянном капилляре, содержащем металлическую термоэлектрическую нить диаметром менее 1 мкм. Снаружи по всей длине капилляр запечатывается слоем парного термоэлектрического материала. Активный слой элемента создается на острие и имеет сечение в несколько квадратных микрометров. Значительное место среди современных приемников занимают термоэлементы торцевого типа [677]. Конструкция элемента Шварца показана на рис. 3.3. Отличительной особенностью торцевых элементов является то, что контакт термоэлектродов осуществляется

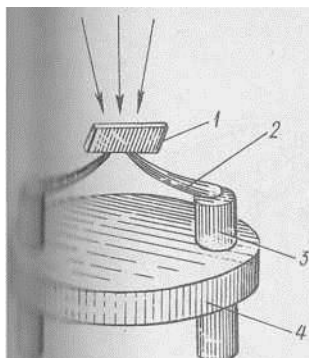


Рис. 3.2. Радиационный термоэлемент

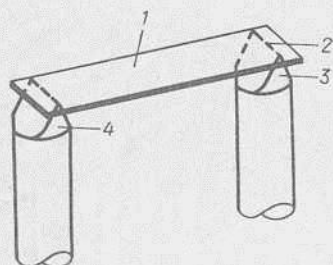


Рис. 3.3. Термоэлемент Шварца

...ается через промежуточное звено. В качестве по-
 ...ого использована металлическая полоска, выпол-
 ...ая одновременно функции приемной площадки. Оди-
 ... термоэлементы применяются в основном для
 ...рания потоков высокой интенсивности. Для малых
 ...щих плотностей потоков используются батарей-
 ... термопреобразователи. Типичная конструкция та-
 ... преобразователя, предложенного Моллем, пред-
 ...ана на рис. 3.4. Термобатарея состоит из четыр-
 ...ти пар медных и константановых полос 1 и 2.
 ...ные спаи 3 образованы в месте контакта полос,
 ...равнения — на коммутационных столбиках 4,
 ...тированных на основании 5. Зоны холодных спаев
 ...т экранироваться от излучения или покрываться
 ...о отражающей краской. Подобные термобатареи
 ...жны по форме: прямоугольные, кольцеобразные,
 ...образные. В звездообразных горячие спаи скон-
 ...рированы в центральной области, а холодные рас-
 ...жены по периферии.

Широкое распространение в приемниках излучения
 ...ли термобатареи типа "вспомогательная стенка".
 ... тепловой контакт горячих и холодных спаев осу-
 ...щается не только по термоэлектродам, но и по ма-
 ...лу, заполняющему пространство между ними.

На гранях стенки возникает разность температур,
 ...ациональная пронизывающему ее потоку. Напри-
 ... в термобатарее Волошина металлические бруски

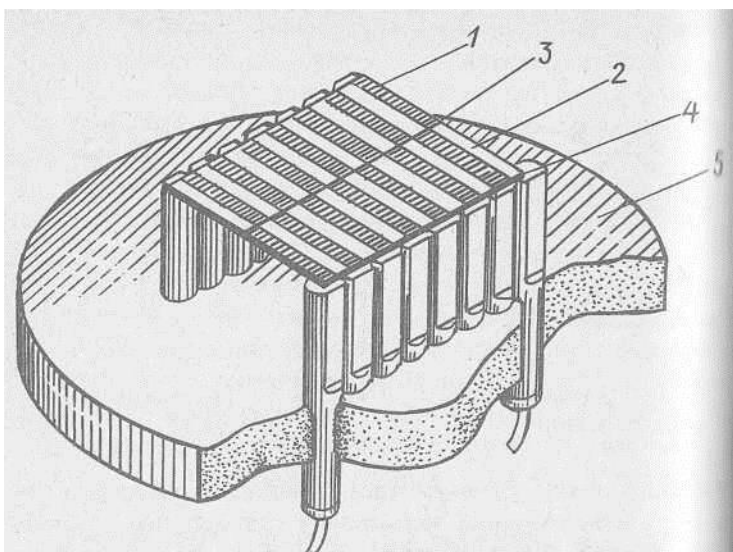


Рис. 3.4. Термобатарея Молля

расположены между полосовидными термоэлектриками (рис. 3.5 [67]). Большой недостаток преобразователя состоит в том, что каждый элемент монтируется на контактную площадку, и разрушение контакта в одном из элементов выводит из строя всю батарею. От этого недостатка свободны батарейные преобразователи, описанные в разделе 3.4.

Как мы уже говорили, сигнал преобразователя, следовательно, его чувствительность зависят от коэффициента Зеебека. Величина последнего является функцией температуры. Таким образом, чувствительность преобразователей также изменяется с изменением собственной температуры. Поэтому характеристики преобразователей определяются не только качествами термоэлектрического преобразователя, но также и устройством обеспечивающими температурный режим собственного преобразователя. По способу обеспечения температурного режима приемники можно разделить на две группы: с переменной и постоянной температурой.

Особенность измерения термопреобразователями переменной температурой спаев сравнения состоит

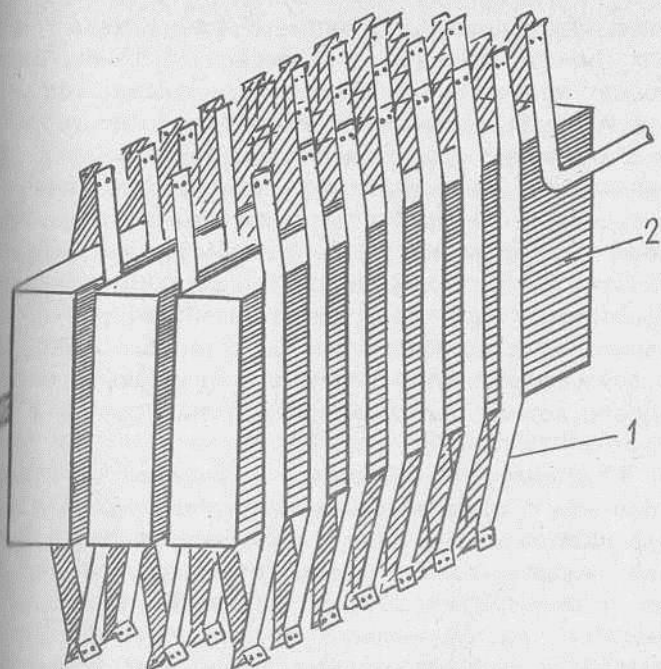


Рис. 3.5. Термобатарея Волошина

... что сигнал преобразователя теплового потока необходимо приводить в соответствие с текущим значением температуры. Методически это может производиться непосредственным измерением температуры потока, на котором расположены спаи сравнения; компенсацией приращения сигнала преобразователя теплового потока, вызванного изменением температуры; нормированием потока, поступающего на спаи сравнения; систематическим сравнением сигнала преобразователя, наведенного измеряемым потоком, с сигналом от эталонного источника; компенсацией рабочего сигнала нормированным потоком энергии. Рассмотрим варианты приемников, в которых использованы перечисленные выше способы учета неостоянства температуры спаев сравнения.

Приборы с непосредственным измерением температуры спаев сравнения имеют встроенные измерители
 1500к

температуры, расположенные в зоне спаев. В приборах Янишевского [8] и Козырева [26] для биологических исследований температура измеряется жидкостными термометрами. В приемниках Козырева для промышленных измерений температурочувствительными элементами служат термометры сопротивления.

Градуировка приборов производится при различных температурах спаев сравнения. Методика измерения состоит в получении двух сигналов (тепло- и термочувствительного) преобразователей. Второй из них указывает градуировочную характеристику, по которой в соответствии с сигналом преобразователя теплового потока определяется величина лучистой энергии.

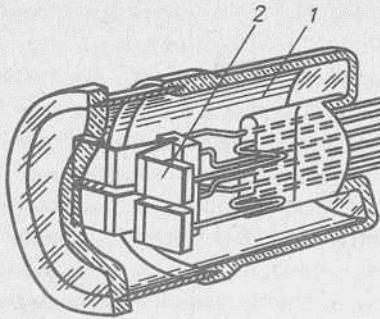
Приборы с компенсацией приращения сигнала, обусловленного изменением температуры, также содержат два элемента — основной и корректирующий. Последний увеличивает или уменьшает сигнал, а следовательно, и чувствительность основного. Например, в приборах [78] за изменением температуры холодных спаев следит термистор, который соответственно изменяет коэффициент усиления включенного в цепь детектора излучения усилителя. Чувствительность прибора к измеряемому потоку при этом остается постоянной во всем диапазоне измерения. Компенсация температурного изменения чувствительности может осуществляться благодаря использованию второго теплоцентра, аналогичного основному. Элемент закрепляется в том же корпусе, но затеняется от воздействия измеряемого потока. Дифференциальное включение чувствительных элементов устраняет влияние флуктуаций температуры корпуса на чувствительность основного преобразователя [11]. В радиометрах Гаррисона использован способ коррекции температурной чувствительности, состоящий в том, что параллельно или последовательно в цепь чувствительного элемента соединяется электрическое сопротивление с температурным коэффициентом, обратным по знаку температурному коэффициенту чувствительности. Шунт монтируется в одном блоке со спаями сравнения. Величина шунтирующего сопротивления рассчитывается

его изменение компенсирует дополнительный сигнал, вызываемый колебаниями температуры.

В приборах, с нормированием потока на спаивания, измерительный преобразователь конструируется таким образом, чтобы его температурный режим зависел в основном от измеряемого излучения, как это сделано в тепловой головке приемника, изображенного на рис. 3.6. Для устранения существенно влияния других потоков термобатарея 2 помещена внутри серебряной гильзы 1, выполняющей роль экрана. Широко используются приемники данного типа, в которых мерой лучистого потока служит равновесная температура горячего спа.

Способ систематического контроля чувствительности с помощью источника, генерирующего опорный сигнал, применяется в основном в приборах с дистанционным управлением [78]. В качестве источников опорного излучения используют лампы накаливания или малогабаритные черные тела. Принцип работы приемников этой группы состоит в сравнении сигналов, полученных от источников нормированного и измеряемого излучений. Для этого предусматривается возможность поочередно вводить их в поле зрения приемника. Опорный излучатель может быть вмонтирован в конструкцию прибора. В приемнике Флинта (рис. 3.7) чувствительный элемент 1 расположен в углублении конической полости 2 (модели абсолютно черного тела), закрытой коллиматорной линзой 3, формирующей в зоне чувствительного элемента параллельный поток. Прибор содержит прерыватель сферической формы 4, вращающийся с необходимой частотой вокруг вертикальной оси. Таким образом, чувствительный элемент попеременно облучается измеряемым потоком опорного излучателя, которым является коническая полость, нагреваемая электрическим нагревателем 5. Излучение полости, отраженное сферическим зеркалом, направляется линзой на детектор. Преимущества приборов с опорными излучателями очевидны: в них проводится не только температурная коррекция чувствительности, но также учитывается ее временная неустойчивость.

Рис. 3.6. Приемник
Грина, Тейлора, Клини



Компенсационный метод измерения состоит в том, что сигнал, генерируемый преобразователем от измеряемого излучения, компенсируется до нулевого значения воздействием нормированной энергии другого источника. Чаще всего тепловая компенсация осуществляется с помощью электрического нагрева. Одним из самых совершенных приборов такого типа является пиррометр Ангстрема [8]. По этому же принципу построен приемник Стафта, изображенный на рис. 3.6.

Измеряемый поток излучения попадает на одну из двух идентичных металлических сфер 1 или 2, чер...

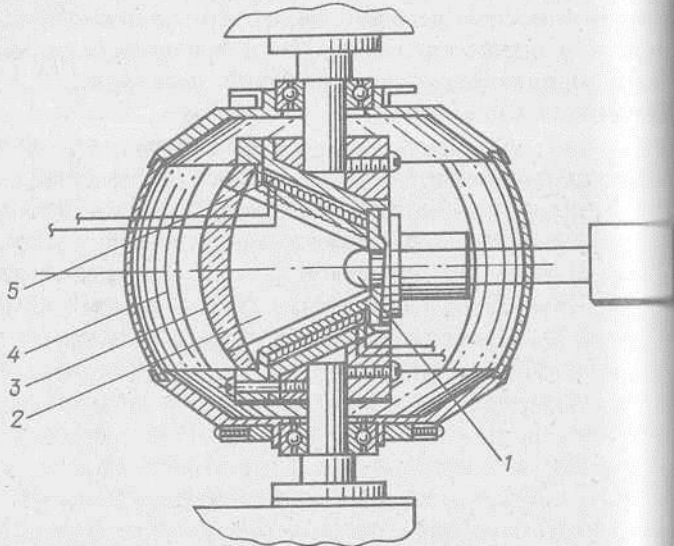
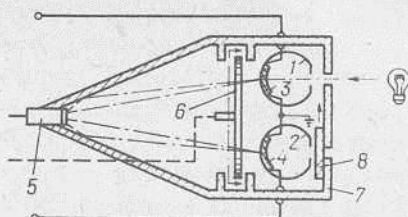


Рис. 3.7. Приемник Флинта

Рис. 3.8. Приемник Стафта



на по наружной поверхности. Вторая сфера при изменении затеняется заслонкой 7 и обогревается с помощью встроенного омического нагревателя 3 или 4. Тепловой поток, излучаемый поверхностями сфер, с помощью прерывателя поочередно подается на термоэлектрический преобразователь 5. Преобразователь выдает пульсирующий электрический сигнал, соответствующий потокам от облучаемой и контрольной сфер. Равность сигналов двух соседних импульсов усиливается и используется для регулирования нагрева контрольной сферы. Когда тепловое излучение сфер одинаково, электрическая мощность подаваемая в обогревающий элемент контрольной сферы, служит мерой энергии, поглощенной облучаемой сферой. Идентичность условий окружения сфер обеспечивает изотермический экран.

Компенсационные двухэлементные приемники являются абсолютными приборами наивысшей точности измерения. Это преимущество первоначально заложено в методике измерения и состоит в том, что исключена необходимость определения чувствительности прибора к всех влияющих на нее поправок. Кроме того, определение компенсирующей энергии производится измерением электрических величин, что при использовании соответствующих приборов сводит погрешность к доли процентов. Основной вклад в систематическую ошибку измерения вносят погрешности определения геометрических размеров преобразователей и терморadiационных характеристик рабочих поверхностей. Специфической трудностью при создании компенсационных приемников является достижение полной взаимозаменяемости чувствительных элементов.

Приемники лучистой энергии со стабилизированной температурой спаев сравнения в зависимости от спо-

способа стабилизации температуры можно разделить на автономные и с промежуточным теплоносителем. К автономным отнесены приборы, термостаты которых не требуют тепловых коммуникаций с внешними контурами теплоносителей. Поддержание необходимого режима стабилизации в таких системах осуществляется пассивно (теплообменом с окружением) или активно (по линиям электрических связей). Простейшим типом автономного стабилизатора является тело с большой массивной теплоемкостью, эффективно работающее в импульсных режимах облученности. В режиме непрерывной облученности стабилизатор имеет ограниченный временной ресурс [71].

В качестве автономных термостабилизаторов в приемниках все шире используются тепловые трубы, холодильники, основанные на эффекте Пельтье. Наибольшей проблемой здесь является обеспечение постоянства температуры в условиях переменных возмущающих воздействий, например при нестационарной тепловой нагрузке. Требуемую точность поддержания температуры спаев сравнения обеспечивают, как правило, только стабилизаторы, спроектированные с учетом особенностей динамики процесса облучения и диапазона измерения.

Приемники с электроподогревом и электронным регулированием температуры корпуса описаны в разделах 3.3; 3.5. Наиболее распространенными являются термостаты с промежуточным теплоносителем. Они обеспечивают постоянство температуры и являются эффективным средством охлаждения чувствительных элементов приборов, поэтому используются в системах с широким диапазоном измеряемых потоков. В приборах с циркуляционным охлаждением используются практически все типы чувствительных элементов. В приемнике с охлаждаемым проволочным термоэлементом, приведенном на рис. 3.9, термостатируемая поверхность 1 имеет форму сферы, внутри которой закреплены спаи сравнения 3. Активные спаи 2 образуют приемную поверхность в виде конической модели абсолютно черного тела. Тепловой поток, попадая во входное отверстие

1	2	3	4	5	6	7	8	9
		мм ²	Ом	Гц	В·Вг ⁻¹	мс	10 ⁻¹⁰ Вг·Гц ^{-0,5}	10 ⁹ Вг ⁻¹ Гц ^{0,5} см
ФИ АН России ФИ АН России	Сплав 99,4 % Вг+0,6 % Рв Вакуумный ФМ-6 (Вг)	2,25 2x10 3,3x3,3	260 150 300	0 250	15 1 0,25	18 35	1 10 100	1,5 0,45 0,01
ЛОМО	БМК-3, БМЦ-7 БМ7-к БМ7-ц	1,9x0,4 1,4x0,2 1,8x0,4	200 170x420 170x420	10 9 9	11 60x130	22 20x30 20x30	1 0,2+0,5 0,2+0,5	1
ИФ АН Украины	Вакуумный (Ni)	1,9x0,4 4x0,55	15 10	9 9	5 3	15 15	0,9-1,0 1-2	1 1,5-0,75
ИФ АН Украины	Газонаполненный (Ni) НБГ-1 окно из кварца (Ni) НБГ-2 окно из KRS-5 (Аu)	2,25x0,55 1,8x1,2 4x0,3	7 6	80 35	0,5 0,2	5 3 0,5	10 10 100	0,1 0,1 0,01
ВНИИОФИ	ВН-10 (Вг-Sb)	0,3x1	200	-	35-100	-	5	-

3.2. Болометры полупроводниковые неохлаждаемые ($T_0 = 295 \text{ K}$) /577

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Организация разработчик	Тип, материал	Площадь чувствительного элемента	Сопротивление	Частота модуляции	Чувствительность модуляции	Постоянная времени	Пороговый ток	Обнаружительная способность
		2 мм ²	Ом	Гц	В/Вт ⁻¹	мс	10 ⁻¹⁰ Вт·Гц ⁻¹ ·0,5	10 ⁹ Вт ⁻¹ ·Гц ⁻¹ ·0,5 см
		1	4·10 ⁵	9	150	25	13	0,08
		-	-	-	50	10	25	0,04
		0,85x2	1,5·10 ⁶	-	170	2,2	1,2	0,11
		0,85-1,8	1,3·10 ⁶	-	124	5,6	1,6	0,08
		1	8·10 ⁵	-	75	14		2,5·10 ⁻³
		2,5x0,5	(2+4)·10 ⁶	10	1000+	12+16	2,5+8,0	
		2,5x0,5	(1,7+4)·10 ⁶	-	300+3000	13+20	2,5+8,0	
		0,7x0,7	1,05·10 ⁶	-	230	2,22	4,8	-

Оксидный:
без подложки
на кварце

Оксидные кобальто-
марганцевые
БКМ-2 (на кварце)
БКМ-4 (на стекле)
БКМ-5

Германиевый с при-
месью сурьмы
БСТ-2

Термисторный иммер-
сионный оксидный ко-

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ГОИ	Р-ге;Sb;га	7x0,8	24,6 15,5	12,5	0,8 1,1 1	2,5 0,11 0,3	10 ⁻¹⁴ Br ⁻¹ Γ _{II} -0,5	10 ¹² Br ⁻¹ Γ _{II} 0,5 см	4,23 2,15 2 3 1,6
ГОИ	ГДГ-0,15), Р-ге;га Р-ге;Sb;ге ге-га(милень из менц) ге;га (милень из феррита) п-Si	0,87x2,7 1 1,7x1,7 3,14	2 50	0 11 30	1,1 1	0,11 2,5 2,5*0,25 36	0,04 0,026 45 6 5 1,2	- 0,34 1,7 3,4	4,2 2,15 2 3 1,6
ИФП АН России	Угольный	3 9 1,7 4x3	20 27 36 10	12,5 12,5 12,5 18+25	1,3 1,4 1,6 1	150 34	3,1	0,13	1,6
ФИ АН России	Р-ге;га Сталлоглеродный	6x5 6,2x9	10x40 660	18	2 10	1 6	300 1000	0,18	1,5 3

3.4. Болонетры сверхпроводниковые [57]

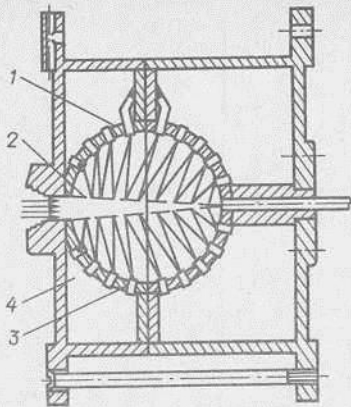
Организация разработчик	Тип, материал	Площадь чувствительного элемента	Темпера- тура	Сопротив- ление	Частота модуля- ции	Чувствительность	Постоянная времени	Пороговый поток	Обнаружи- тельная способ- ность
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ГОИ	Нечерненный (Sn)		3,54	1	10	1000	30	0,002	1500
	Изотермический нечер- ненный (Sn)		3,71	2,5	12,5	100	7	0,03	100
ГОИ	Изотермический	10x1	3,3	0,5	12,5	120	7	0,004	800
	Черненный (Sn)		3,45	6	10	410	30	0,006	500
	Неизотермический (Sn)		4,39	2	12,5	28		0,13	25
	Изотермический		4,45	4		30		0,23	14
	Нечерненный Pb-Sn	5x5	2,1	63	-	0,18	5·10 ⁻⁶	1200	0,004
	Ag+Sn (двойная сплавка)	2,3x2,3	2,1	15	10	0,8	5·10 ⁻⁶	400	5,8·10 ⁻³
	Sn на Al ₂ O ₃	5x5	4,2	140	105	10,5	1,6·10 ⁻³	1,3	38
		1x1	4,2	150	103	10,3	450	1,6·10 ⁻³	0,13
							10 ⁴ Гц	4·4·10 ⁻²	0,019

3.6. Радиационные термометры-образователи металлческие ($T_0 = 295 \text{ К}$)

1	2	3	4	5	6	7
Организация разработчик	Тип материала	Площадь чувствитель- ного элемента	Сопротив- ление	Чувствитель- ность по по- току	Постоянная времени	Диапазон измерений
		мм ²	Ом	Вт·м ⁻² ·мВ ⁻¹	с	Вт·м ⁻²
1		3	4	5	6	7
ИТТФ АН Украины	Проволочные: с плоской приемной площадкой	1±100	10±2000	5±1500	1±7	10±500·10 ³
	конические	φ 4, φ 10	500±2000	200±1000	0,5±5	(500±3000)·10 ³
	шаровые	φ 6	500±2000	500±2000	0,5±7	(500±7000)·10 ³
	Пленочные	4±100	200±3000	5±100	0,02±0,3	1±10 ⁵

Средства разработчик	Тип	Площадь чувствительного элемента	Сопротивление	Частота модуляции	Чувствительность	Постоянная времени	Пороговый поток	Область жесткости	Диапазон измерения потоков
	2	мм ²	Ом	Гц	В·Вг	м ²	Вг·Гц	Вг·Гц	Вг·м ⁻²
1		3	4	5	6	7	8	9	10
	ТП 0,2x2	0,2x2	9	0	8	40	-	1	
	ТП 0,3x3	3x0,3	36	0	90±150	60	-	1	
	ТП 0,3x3	3x0,3	36	3±5	18	40	0,44	2,4	
		8	2,6	-	0,039	2800			
МЭИ	для ИКС-23	2,8x0,5	10	9	2,9	87	1,4	0,85	
ЛОМО	ПРТЭ-2	2,8x0,5	5,2	12	4	20	0,75	1,34	
	ПРТЭ-3	1,9x0,5	8,8	12	9,7	10	0,4	1,8	

Рис. 3.9. Приемник Гинзбурга



тие сферы, большей частью поглощается спаями 2. Часть потока, прошедшая мимо горячих спаев, многократно отразившись от полированной сферической поверхности, в конечном счете также поглощается.

Достоинством прибора с циркуляционными термометрами является их способность измерять высокие плотности энергий [84].

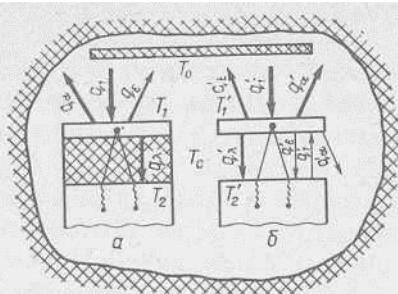
3.2. Основы измерения потоков теплового излучения

Для анализа теплового состояния приемников излучения с термоэлектрическим чувствительным элементом рассмотрим систему, состоящую из источника измеряемого излучения, приемника и окружающей среды. Схематически тепловая и температурная обстановка рассматриваемой системы показаны на рис. 3. В системе представлены две группы термоэлектрических приемников: 1 - с чувствительным элементом "вспомогательная стенка"; 2 - с чувствительным элементом, горячие и холодные слои которого разделены газовой средой. Оба элемента имеют одинаковую форму и площадь тепловоспринимающих поверхностей.

Рассмотрим уравнения баланса энергии для каждого из преобразователей. Для приемника с термоэлектрическим

Рис. 3.10. Тепловая температурная обстановка системы "источник - среда - приемник":

а - термоэлемент типа "вспомогательная стенка"; б - термоэлемент со спаями, разделенными средой



Для первого типа этот баланс можно записать следующим образом:

$$a \delta T_0^4 = \epsilon \delta T_1^4 + \lambda_{1 \text{эф}} (T_1 - T_2) \cdot \delta^{-1} + \alpha_K (T_1 - T_C), \quad (3.1)$$

где $a \delta T_0^4$ - теплота, поглощенная приемной поверхностью; $\epsilon \delta T_1^4$ - мощность собственного излучения с этой поверхности; $\lambda_{1 \text{эф}} (T_1 - T_2) \delta^{-1}$ - тепловой поток, перетекающий от облучаемой поверхности элемента к необлучаемой путем теплопроводности через вспомогательную стенку, т.е. пронизывающий поток; $\alpha_K (T_1 - T_C)$ теплотери с поверхности преобразователя в окружающую среду.

Обозначим соответствующие символы второго элемента знаком "штрих" и предположим, что температура среды во всем объеме одинакова. При этом уравнение баланса энергии для приемника второго типа записывается в виде

$$a' \delta T_0^4 = \epsilon' \delta T_1'^4 - \epsilon' \delta T_2'^4 + \epsilon' \delta T_1'^4 + 2\alpha_K' (T_1' - T_C) + \lambda_{2' \text{эф}} (T_1' - T_2') \cdot \delta^{-1}, \quad (3.2)$$

где $a' \delta T_0^4$ - теплота, поглощенная приемной поверхностью; $\epsilon' \delta T_1'^4$, $\epsilon' \delta T_2'^4$ - теплота, излучаемая ею в окружающее пространство и в сторону затененного пространства; $2\alpha_K' (T_1' - T_C)$ - теплотери за счет конвективно-теплообмена с обеих сторон приемной пластины; $\lambda_{2' \text{эф}} (T_1' - T_2') \cdot \delta^{-1}$ - теплопроводная составляющая баланса.

Параметры системы, влияющие на статьи баланса можно разделить на внутренние и внешние. К внутренним отнесем теплофизические характеристики приемника и его геометрические размеры, к внешним (зависящим от свойств окружения) – температуру излучателя и среды, коэффициент теплоотдачи конвекцией, определяемый составом среды, давлением и скоростью перемещения, оптические характеристики.

Учитывая, что сигналы термоэлектрических элементов пропорциональны разности температур облучаемых и затененных слоев, проанализируем их возможные значения для каждого элемента. В первом приближении можно исключить влияние поглощательных и излучательных способностей и предположить, что их значения равны единице. В этом случае из (3.1) и (3.2) получим соответственно.

$$T_1 - T_2 = \frac{\sigma(T_0^4 - T_1^4) - \alpha_K(T_1 - T_C)}{\lambda_{1эф} \cdot \delta^{-1}}, \quad (3.3)$$

$$T_{1'} - T_{2'} = \frac{\sigma(T_0^4 - T_{1'}^4) - 2\alpha'_K(T_{1'} - T_C)}{\sigma(T_{1'} + T_{2'})(T_{1'}^2 + T_{2'}^2) + \lambda_{2'эф} \cdot \delta^{-1}}. \quad (3.4)$$

ТермоЭДС, генерируемые элементами, определяются из соотношений

$$e = \alpha \frac{\sigma(T_0^4 - T_1^4) - \alpha_K(T_1 - T_0)}{\lambda_{1эф} \cdot \delta^{-1}}; \quad (3.5)$$

$$e' = \alpha \frac{\sigma(T_0^4 - T_{1'}^4) - 2\alpha'_K(T_{1'} - T_C)}{\sigma(T_{1'} + T_{2'})(T_{1'}^2 + T_{2'}^2) + \lambda_{2'эф} \cdot \delta^{-1}}. \quad (3.6)$$

В выражениях (3.5) и (3.6) числители представляют собой значения тепловых потоков, перетекающих от облучаемых слоев к затененным, т.е. потоков, вызывающих преобразователь. Коэффициент пропорциональности между этим потоком и сигналом датчика

принято называть чувствительностью к пронизывающему потоку или коэффициентом преобразования. Таким образом, выражения для чувствительности получили вид

$$S = \frac{\alpha}{\lambda_{1\varepsilon\varphi} \cdot \delta^{-1}}; \quad (3.7)$$

$$S' = \frac{\alpha}{\sigma(T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2) + \lambda_{2\varepsilon\varphi} \cdot \delta^{-1}} \cdot (3.8)$$

Чувствительность преобразователя типа "вспомогательная стенка" определяется только его теплофизическими и геометрическими характеристиками. Чувствительность же элемента с разделенными спаями не только зависит от теплофизических свойств и размеров элемента, но является еще и нелинейной функцией температур обоих спаев. Как видно из (3.8), для рационализации чувствительности приемника целесообразно увеличивать теплопроводность элемента. Этот вывод дополняется еще и тем, что теплопроводная составляющая баланса является единственной составляющей, не зависящей от внешних параметров. Поэтому чем больше ее доля в общем балансе, тем меньше внешние оказывают влияние на генерируемый сигнал и, следовательно, на чувствительность прибора. Оба эти обстоятельства подтверждают преимущества использования в приемниках теплового излучения термоэлектрических преобразователей типа "вспомогательная стенка". Теория прогнозирования входных параметров термоэлементов позволила обеспечить приемники элементами с высокой чувствительностью при относительно малой инерционности.

3.3. Методы измерения. Схемы приборов

Методы измерения потоков теплового излучения разработаны с учетом конкретных особенностей источника "источник - среда - приемник". Условия эксплуатации в зависимости от преобладающего влияния того-либо внешнего параметра условно можно раз-

делить на три типа: нормальные условия, при которых теплоотдача с приемной поверхности определяется свободной конвекцией и излучением; условия вакуума, при которых теплоотдачей конвекцией с приемной поверхности можно пренебречь; условия, в которых окружающая среда находится при повышенных давлениях и температурах, т.е. при значительной теплоотдаче вынужденной конвекцией, причем среда может оказывать агрессивное воздействие на прибор.

В основу всех методических и схемных решений описанных ниже приемников положено теплотрическое устройство, изображенное на рис. 3.11. Преобразователь теплового потока 3 расположен между двумя тонкими пластинами 1 и 5, которые являются хорошими проводниками теплоты. Пластины обеспечены электронагревателями 2 и 4. Принцип действия приборов — отождествление измеряемой величины с эталонной (образцовой) мерой. В связи с высокой теплопроводностью пластин процесс рассеивания теплоты не зависит от природы подведенной к ним энергии. Это обстоятельство позволяет в качестве образцовой меры использовать Джоулево тепло, выделяющееся при электрообогреве пластин.

Органом, фиксирующим результат сравнения, служит преобразователь теплового потока. Схема симметрична по своим параметрам: каждая из пластин может использоваться как в качестве компенсационной, так и рабочей, воспринимающей измеряемое излучение.

Измерение лучистой энергии может производиться в различных режимах, актуальных для конкретных условий эксперимента: последовательного замещения, дополнительного замещения, балансом.

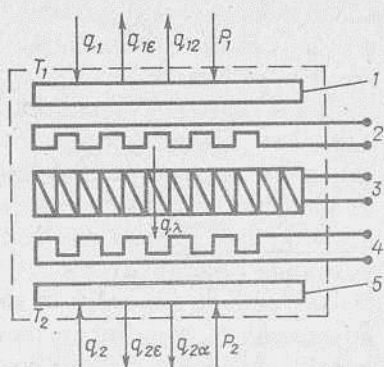
При последовательном замещении режимов измерение проводится в два этапа. Вначале осуществляется экспонирование прибора исследуемым потоком и измеряется сигнал преобразователя. Баланс энергии при этом может быть записан в виде

$$q_1 - q_2 = k\epsilon + (q_{1\epsilon} - q_{2\epsilon}) + (q_{1a} - q_{2a}). \quad (3.9)$$

Затем излучатель выключается и при неизменных

рис. 3.1.1. Схема теплометрического измерительного устройства:

1 - приемная пластина, 2 - резистор, 3 - датчик теплового потока, 4 - резистор, 5 - компенсационная пластина



в метрах окружения производится электрообогрев рабочей пластины. Этому условию соответствует следующее уравнение теплового баланса:

$$P_1 - q_2 = kE + (q_{1\epsilon} - q_{2\epsilon}) + (q_{1\alpha} - q_{2\alpha}). \quad (3.10)$$

Величина плотности мощности электронагревателя задается такой, чтобы сигнал датчика восстановился до первоначального значения. При этом получается, что $q_1 = P_1$. Данный метод применим при неизменных условиях течения опыта внешних параметрах системы и возможности выключения излучателя. Поэтому чаще всего он используется в лабораторной обстановке при нормальных условиях окружения.

Метод дополнительного замещения режимов позволяет проводить измерения без изменения режимов излучения и перерыва в экспозиции приемника. Метод заключается в том, что к одной из пластин с помощью электронагревателя дискретно подводится нормированное количество теплоты, вызывающее соответствующее приращение сигнала преобразователя. Отношение дополнительно подведенной энергии к вызванному ею приращению сигнала определяет чувствительность прибора. С целью устранения воздействия дополнительного обогрева на параметры преобразователя нагрев осуществляется таким образом, чтобы изменение сигнала не превышало 5...10 % от номинального значения.

Третий метод измерения основан на использовании стационарных теплотричной системы, при которых она

поддерживается в режиме нулевого пронизывающего потока за счет адекватного электрического нагрева компенсационной пластины. В широком диапазоне измерения чувствительность системы лишь косвенно зависит от чувствительности преобразователя. Для измерения не требуется информации о ней и, следовательно, о температурном режиме системы. Два последних способа измерения находят применение в любых условиях эксплуатации.

На основе описанных методов разработаны схемы приборов: балансометрические, с измерением сигнала измерительного преобразователя и датчика температуры, со стабилизацией температуры затененной пластины, с синхронной градуировкой.

В основу балансометрических приемников положена схема, изображенная на рис. 3.11. Измерение проводится методом последовательного замещения или полной компенсации сигнала, обусловленного потоком излучения с помощью электронагрева. Другая группа приборов с измерением сигналов измерительного преобразователя и датчика температуры основана на использовании такой теплотметрической системы, которая структурно аналогична балансометрической и имеет только методическое отличие, состоящее в том, что каждая из пластин может служить как нагревателем, так и термометром. Такой приемник, обеспеченный преобразователем с термостойкостью 600 К, выдерживает в вакууме потоки до 20 кВт·м⁻². Поток, воспринятый пластиной 1, может быть представлен в виде

$$q_1 = f_1(T_1) + f_2(T_1)e \quad \text{или} \quad q_1 = f_1'(T_2) + f_2'(T_2)$$

Первый член правой части каждого из уравнений представляет собой зависимость потока собственного излучения пластины от фиксированной температуры одной из поверхностей преобразователя. Второй член описывает зависимость между пронизывающим потоком и его температурой и по существу является функциональной зависимостью коэффициента термопреобразователя от температуры. Совокупность этих двух зависимостей

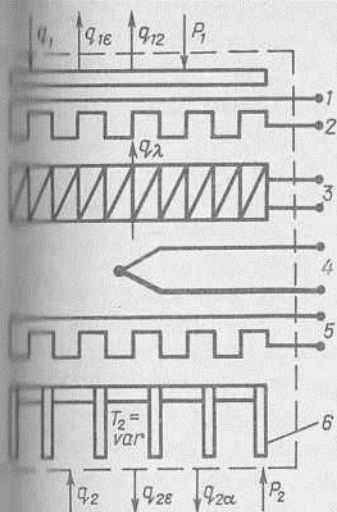


Рис. 3.12. Схема приемника с измерением сигнала преобразователя теплового потока и датчика температуры: 1 - приемная пластина, 2 - электроннагреватель, 3 - датчик теплового потока, 4 - датчик температуры, 5 - электроннагреватель, 6 - корпус-излучатель

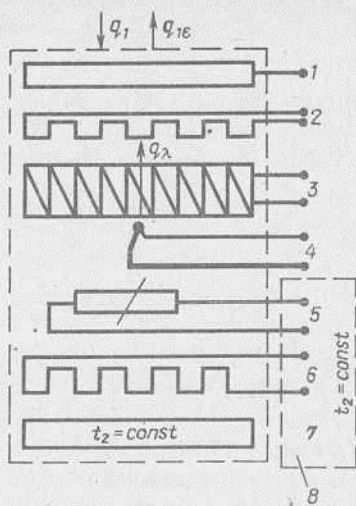


Рис. 3.13. Схема приемника с термостабилизацией затененной поверхности: 1 - приемная пластина, 2 - нагреватель, 3 - преобразователь теплового потока, 4 - термометр, 5 - чувствительный элемент терморегулятора, 6 - нагреватель корпуса, 7 - корпус, 8 - блок терморегулятора

может служить аттестационной характеристикой приемников с измерением двух сигналов (рис. 3.12).

В описанных схемах температура чувствительного элемента и, следовательно, его рабочий коэффициент в значительной мере зависят от величины измеряемого потока и условий теплосброса в окружение. Для устранения этого недостатка разработаны схемы приемников с постоянной температурой спаев сравнения (рис. 3.13). Стабилизация температуры может осуществляться на уровне выше или ниже равновесной



Рис. 3.14. Характеристика системы термостабилизированного корпуса

температуры для данных условий измерения. Характеристика стабилизированной системы представлена на рис. 3.14. Условию $T_1 < T_2$ при $T_2 = const$ соответствует такое состояние системы, когда теплота перетекает от пластины 2 к пластине 1. Для этого к пластине 2 должна быть подведена энергия от внешнего источника.

С точки зрения расширения диапазона измерения эффективен режим стабилизации, обеспечивающий условие $T_1 > T_2$ при $T_2 = const$. В этом случае теплота от пластины 2 должна активно отводиться. Для этого используются термоэлектрические холодильники, стабилизаторы, фазопереходные и циркуляционные мосты [48].

3.4. Элементная база приемников теплового излучения

В последовательном ряде приборов для измерения плотности потоков теплового излучения в диапазоне $100 \div 3 \cdot 10^6$ Вт·м⁻² в качестве чувствительных элементов применены термоэлектрические батареи-преобразователи типа "вспомогательная стенка". Приборы-приемники как средства широкого практического использования должны обладать прежде всего воспроизводимостью характеристик при длительной эксплуатации в расчетных режимах, а также в кратковременных критических ситуациях. Естественно, что в первую очередь это относится к чувствительным элементам. Высокая надежность, технологичность, возможность прогнозирования и стабилизации чувствитель-

сти в широком интервале температур, а также эко-
номический фактор определили выбор именно этих пре-
образователей.

Использованы теплотермические модули трех моди-
фикаций. Модуль преобразователя первого типа пред-
ставляет собой батарею с большой плотностью уклад-
ки термоэлементов (рис. 3.15). Термоэлемент состо-
ит из полувитка основного термоэлектродного провода
и полувитка гальванически покрытого слоем парного
электродного материала. Элементы скреплены между собой и заформо-
ваны в виде камушка, скрепленного полимерным или
керамическим компаундом. Термическая стойкость преоб-
разователей достигает 600 К. При более высоких тем-
пературах наблюдается диффузия между основой и по-
крытием биметаллического электрода, что приводит к
неустойчивости коэффициента преобразования элемента.

С целью повышения термической стойкости прибора
разработана вторая модификация преобразователя [48].
Она отличается тем, что гальванический элемент заме-
нен проволочным (рис. 3.16). Две проволоки 1 и 2
из парных электродов в температуростойкой изоляции
намотаны в виде плотной спирали на пластиковую
подложку, которая укладывается зигзагообразно в форму
камешка и заливаются компаундом 4. После спекания торцы по-
лученного камушка протираются до нарушения электри-
ческой связи между отдельными витками спиралей.

В таком состоянии камушки представляют собой систе-
матический набор большого числа парных термоэлек-
тродных стержней. Коммутация между парными стерж-
нями осуществляется вакуумным напылением металли-
ческих площадок 3 через маску.

Кроме повышения верхнего предела рабочей темпе-
ратуры до 900 К, достоинство такого преобразовате-
ля состоит также в том, что в нем устранены верхний
и нижний слои стенки, не участвующие в генерирова-
нии сигнала. Это позволило значительно снизить инер-
ционность преобразователя без ущерба для чувствитель-
ности.

Возможность варьирования каждой из этих характе-
ристик может быть выявлена из их взаимосвязи.
Рассмотрим процесс установления разности температур

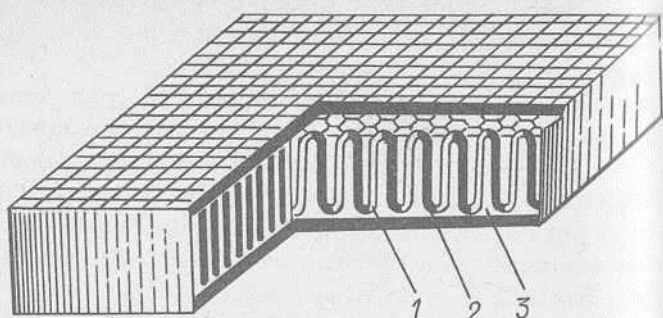


Рис. 3.15. Модуль преобразователя первого типа:
 1 - термоэлектрод из основного материала;
 2 - термоэлектрод гальванический, 3 - наполнитель.

облучаемой и затененной поверхностей стенки и, следовательно, сигнала преобразователя после внесения малого изменения облученности. Поскольку основная часть воспринятой облучаемой поверхностью энергии отводится теплопроводностью вдоль электродов термобатареи, то распределение температуры в детекторе с термобатареи с стабилизированным стоком в соответствии со схемой, приведенной на рис. 3.17,а, описывается уравнением

$$\frac{dt}{d\tau} = a_g \frac{d^2t}{dx^2}.$$

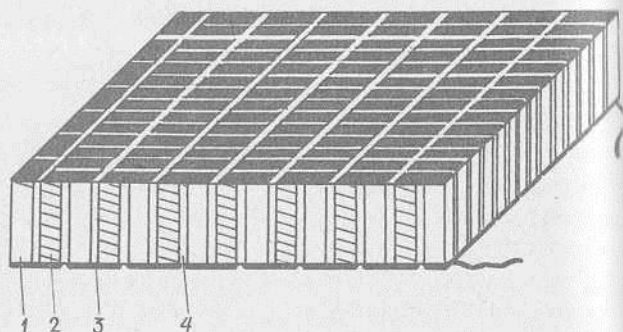


Рис. 3.16. Модуль преобразователя второго типа:
 1, 2 - термоэлектроды; 3 - коммутационные пластины;
 4 - наполнитель

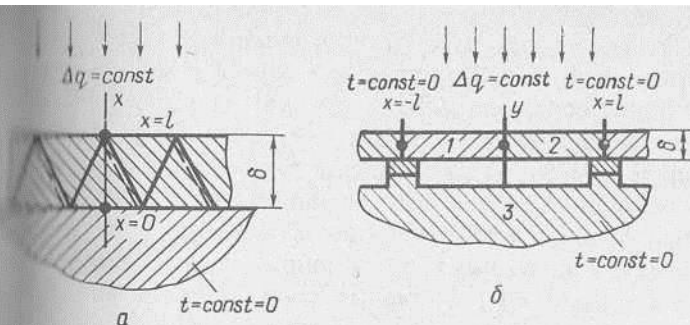


Рис. 3.17. Схемы чувствительных элементов: а - типа "вспомогательная стенка"; б - пленочного

с краевых условиях: начальном $t(x, 0) = 0$ и граничных

$$-\lambda q \frac{dt(x, \tau)}{dx} \Big|_{x=\delta} = q = \text{const}; t \Big|_{x=0} = \text{const} =$$

тогда это уравнение для $x = \delta$ имеет вид

$$t(\delta, \tau) = \frac{q\delta}{\lambda g} \left\{ 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{a g (2n+1)^2 \tau}{4\delta^2}\right] \right\}. \quad (3.11)$$

Из выражения (3.11) видно, что быстродействие прибора можно увеличивать повышением теплопроводности преобразователя и уменьшением его толщины.

В этом постоянная времени снижается пропорционально квадрату изменения толщины, а потеря чувствительности имеет линейный характер. Возможности технологического процесса изготовления преобразователя позволили уменьшить его толщину до 0,5 мм, что соответствует постоянной времени в нормальных условиях для модуля первого типа - 1 с, для модуля второго типа - 0,5 с. Для более быстродействующих датчиков используются модули третьего типа - тонкопленочные батарейные преобразователи, изготовленные методом термического напыления в вакууме [48/

По существу их конструкция несколько отходит от канонической теплотеметрической формы с использованием метода "вспомогательной стенки" (рис. 3.17). Батарея располагается в плоскости, воспринимающей тепло излучения, и состоит из единичных термоэлементов, спаи сравнения которых помещены на теле корпуса термостабилизатора, спрофилированного в виде пазов и выступов, и имеют постоянную температуру в точках $x = 1$ и $x = -1$. Активные спаи, равновесная температура которых определяется измеряемым излучением, расположены над серединами пазов в точках $x = 0$. Процесс формирования сигнала элемента определяется закономерностью изменения температуры активного спаи. В первом приближении можно предположить, что электроды однородны по своей структуре, их теплофизические параметры не зависят от температуры. Так как $l/\delta \gg 1$, то разность температур, возникающая в направлении оси y , пренебрежимо мала, при этом принятое спаем тепло отводится теплопроводностью вдоль электродов. В этом случае распределение температуры в каждом из электродов под воздействием внезапного скачка облученности может быть получено из одномерного неоднородного уравнения теплопроводности

$$\frac{dt}{d\xi} = a_3 \frac{d^2 t}{dx^2} + \frac{q}{c\rho\delta} \quad (3.12)$$

Решение уравнения (3.12) при краевых условиях начальном $t(x, 0) = 0$ и граничных

$$\left. \frac{dt(x, \xi)}{dx} \right|_{x=0} = 0; \quad t(x, \xi) \Big|_{x=1} = t(x, \xi) \Big|_{x=-1} = \text{const}$$

полученное методом Фурье [35] для точки активного спаи, имеет вид

$$t(0, \xi) = \frac{q l^2}{2\lambda\delta} \left\{ 1 - \frac{32}{9^3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)^3} \exp\left[-\frac{a_3 (2n+1)^2 \xi}{4l^2}\right] \right\} \quad (3.13)$$

лиз (3.13) показывает пути снижения инерционности преобразователя за счет сокращения длины элементов и увеличения температуропроводности их материалов. Оптимизация по чувствительности предполагает обратное. Поэтому при конструировании выбирают компромиссные решения с учетом требуемых показателей.

3.5. Устройство теплотметрических приемников теплового излучения

Конструктивные решения приемников определяются совокупностью общих требований, предъявляемых к теплотметрической аппаратуре, и специальных требований, зависящих от условий эксплуатации. К общим требованиям относятся: временная стабильность рабочих характеристик, высокая чувствительность при минимальной инерционности, равномерность спектральной характеристики приемной поверхности в рабочем диапазоне потоков и подчинение ее закону Ламберта, единство характеристик серии однотипных элементов, достаточная механическая прочность, стойкость к резким колебаниям температур и давлений, возможность использования стандартной регистрирующей аппаратуры, надежность и простота эксплуатации.

Специальные требования в каждом конкретном случае зависят от назначения аппаратуры. Например, к приборам, предназначенным для работы в условиях вакуума, таковыми являются: обеспечение приемника автономной системой теплоотвода и энергоснабжения, возможность регистрации в условиях переменных боковых подсветок только полусферического излучения со стороны исследуемого источника, возможность проверки чувствительности прибора без нарушения теплового вакуумного режимов объекта, достаточная вакуумная стойкость узлов прибора.

Специальные требования к аппаратуре, предназначенной для работы в напряженных условиях, например, в камерах парогенераторов, газовых и коксовых печах, камерах сгорания: стойкость в условиях агрессивных сред, отсутствие специальных коммуникаций для об-

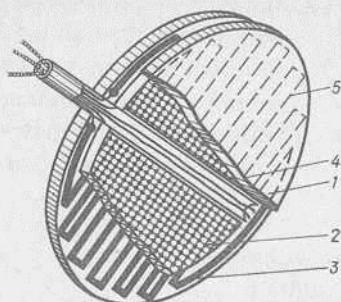


Рис. 3.18. Конструкция балансометрического приемника:
 1 - приемная пластина; 2 - преобразователь; 3 - электронагреватель; 4 - чернящее покрытие; 5 - электронагреватель

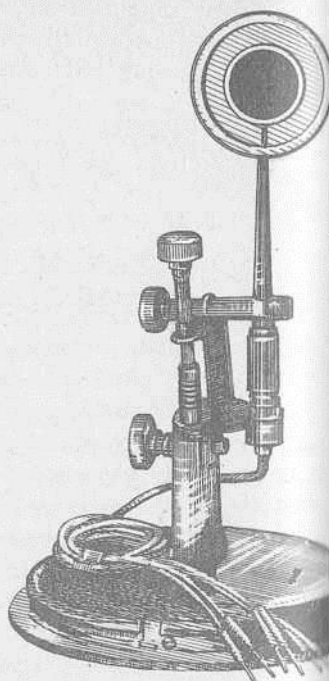


Рис. 3.19. Общий вид балансометрического приемника

служивания приборов, независимость измерений от влияния переменных магнитных полей и вибраций.

Для балансных измерений используется симметричная теплотрическая система, представленная на рис. 3.18 и 3.19. Преобразователь обклеивается миниевыми фольговыми дисками с электрическими нагревателями. Последние наносятся вакуумным пылением на изоляцию, полученную анодным окислением алюминиевой поверхности. Изолируя электрически, оксидная пленка обеспечивает хороший тепловой контакт между нагревателем и несущей пластинкой. Устройство симметрично по всем параметрам. Каждая из пластин может быть использована как в качестве компенсационной, так и в качестве рабочей, воспринимающей измеренное излучение. Блок чувствительного элемента смонтирован внутри металлического корпуса.

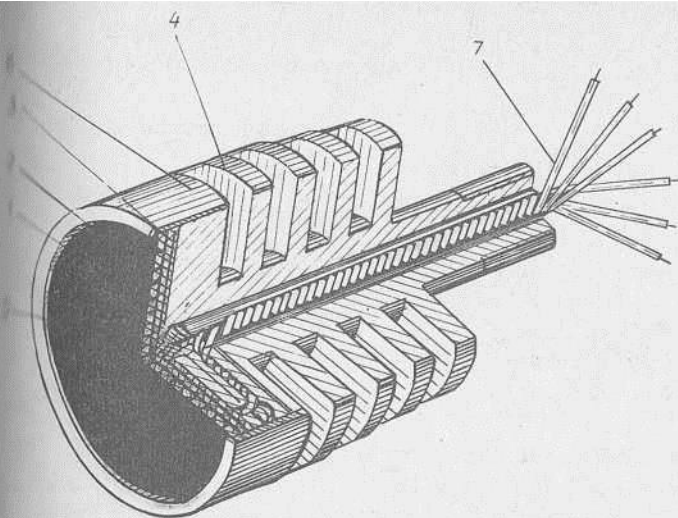


рис. 3.20. Приемник с измерением сигналов преобразователя теплового потока и датчика температуры: 1 - приемная поверхность; 2 - нагреватель; 3 - преобразователь теплового потока; 4 - корпус-излучатель; 5 - термопара; 6 - бленда; 7 - токоведущие провода

повышающего его от боковых подсветок и механических повреждений. Кольцо укреплено на трубке, которая одновременно служит кожухом для токоведущих проводников и креплением на параллактическом штативе. На конце трубки провода паяны на штекерный разъем. Размеры приемника: диаметр 34 мм, высота 10 мм. Теплометрическая система с измерением двух сигналов отличается от симметричной балансометрической только наличием датчика температуры на одной из поверхностей преобразователя. Для обеспечения более эффективного отвода энергии при измерении потоков высокой плотности (30 и более кВт/м^2) теплометрическая головка устанавливается на торце корпуса-излучателя (рис. 3.20, 3.21).

Прибор с регулируемым электроподогревом корпуса температуры, превышающей равновесную, изображен на рис. 3.22. На облучаемой стороне преобразователя смонтирован приемный диск 2 из тонкой алюми-

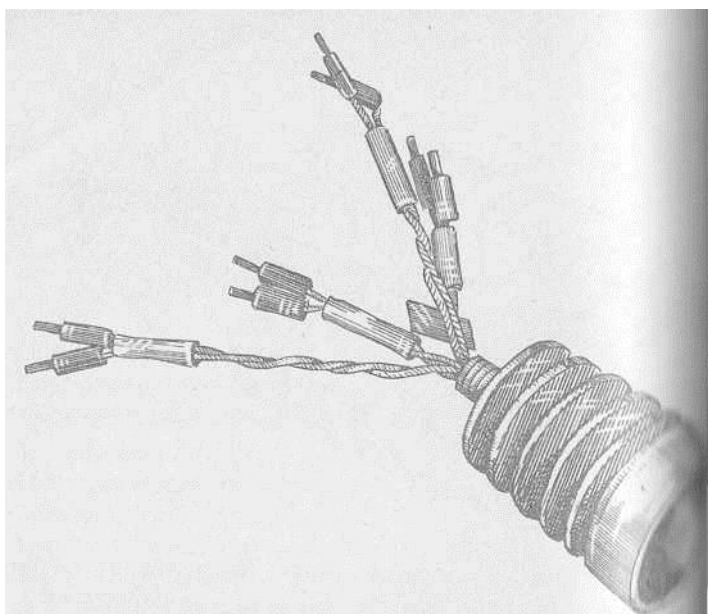
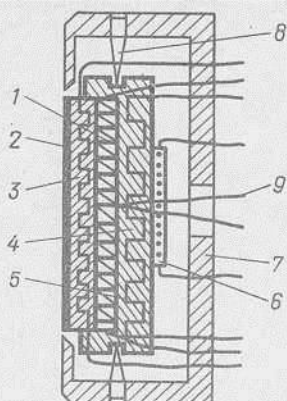


Рис. 3.21. Общий вид прибора с измерением теплового потока преобразователя теплового потока и датчика температуры

вой фольги. На внутреннюю сторону диска нанесен диригированный нагреватель 3. Для получения хорошего теплового контакта диск приклеен к торцу преобразователя. Другой стороной преобразователь приклеен к корпусу 4. Нагрев корпуса осуществляется с помощью электронного нагревателя 5. Сила тока в нагревателе можно регулировать специальным электронным устройством по сигналу резистивного термочувствительного элемента 6. Номинальное значение стабилизированной температуры контролируется термочувствительным элементом 9. Блок чувствительного элемента помещен на трех осях 8 внутри экрана-бленды 7. Токовые провода через дно экрана выведены на штекерный разъем. Электронный термостабилизатор смонтирован в отдельном блоке. При измерении потоков $7,5 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$ рабочая характеристика практически линейная. На рис. 3.23, показан термостабилизированный приемник с пленочным чувствительным элементом.

3.22. Приемник с регулируемым электроподогревом (а)

1 - преобразователь теплового потока; 2 - приемная пластина; 3 - электроннагреватель; 4 - корпус; 5 - электродвигатель; 6 - резистор; 7 - экран; 8 - подвеска; 9 - термометр



Основное преимущество приемников с циркуляционными термостабилизаторами состоит в способности извлекать энергию высоких плотностей. Положительно зарекомендовал себя приемник, изображенный на рис. 3.24. Он сохраняет постоянство чувствительности до входной плотности $500 \text{ кВт}\cdot\text{м}^{-2}$. Это качество позволяет благодаря применению теплового шунтирования приемной пластины. При этом часть поглощенной ею энергии отводится через параллельный преобразователь тепловой канал 7. Пропускная способность шунта, определяемая его размерами и теплофизическими свойствами материала, рассчитывается исходя из требуемой чувствительности и быстродействия. Общий вид приемника приведен на рис. 3.25. Описанные выше приемники эффективно используются как в нормальных условиях, так и в вакууме.

Основной задачей при создании приемников для эксплуатации в агрессивных средах является защита чувствительного элемента от воздействия среды, а при измерении потоков плотностью более $500 \text{ кВт}/\text{м}^2$ - от нагрева.

Конструктивное решение приборов для измерения потоков плотностью более $500 \text{ кВт}\cdot\text{м}^{-2}$ базируется на двух свойствах полостей. Одно из них заключается в том, что эффективные излучательная и поглощательная способности полости определяются в основном отношением площадей входного отверстия и внутрен-

ней поверхности. Второе заключается в том, что эффективные излучательная и поглощательная способности полости определяются в основном отношением площадей входного отверстия и внутрен-

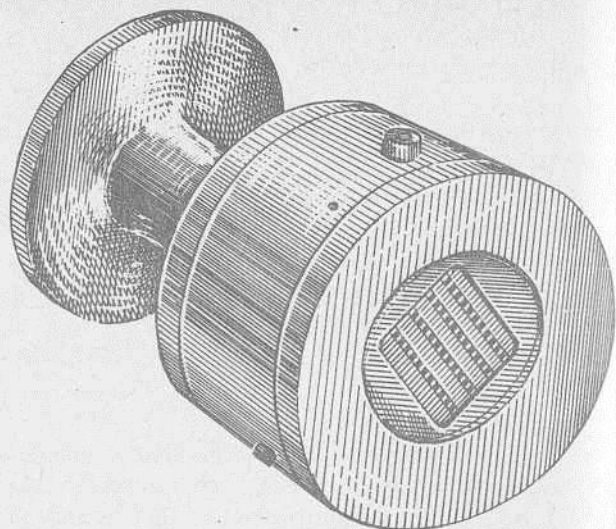


Рис. 3.23. Общий вид приемника с пленочным чувствительным элементом

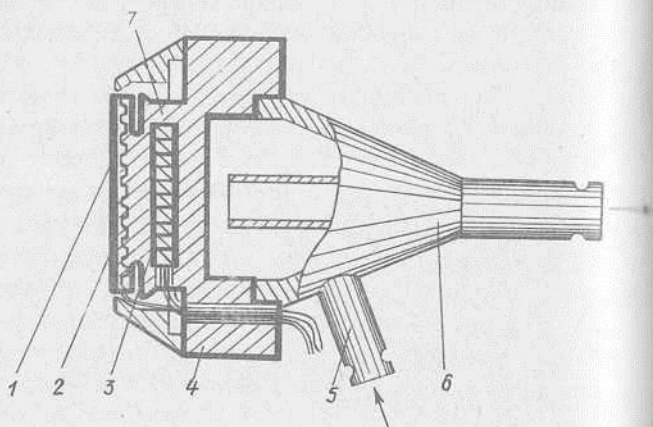


Рис. 3.24. Приемник водоохлаждаемый с тепловым шунтом:

1 - приемная пластина; 2 - градуировочный элемент; 3 - преобразователь теплового потока; 4 - корпус; 5, 6 - система охлаждения; 7 - тепловой шунт

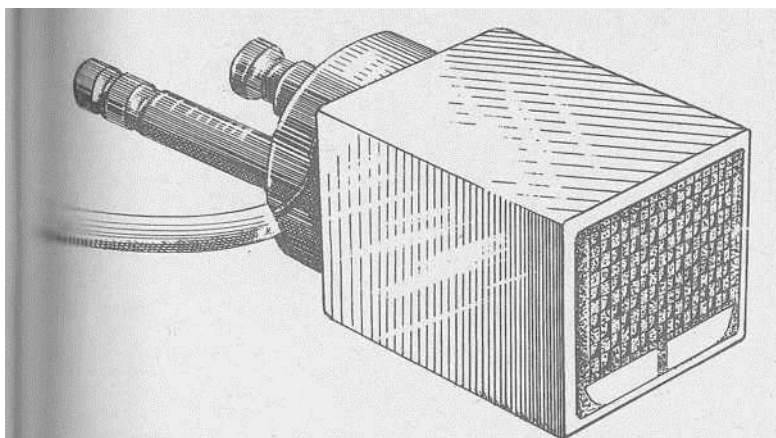


рис. 3.25. Общий вид приемника с циркуляционным термостабилизатором корпуса

и (поверхности и в) меньшей степени зависят от собственных терморadiационных свойств покрытия. Использование этого качества, а именно выполнение приемной поверхности в виде полости позволило сделать приемник устойчивым к такому трудно устранимому с помощью технологических приемов фактору, как деградация терморadiационных свойств покрытий. Второе свойство полости (обладающей к тому же стенкой достаточной теплопроводности) состоит в том, что энергия, воспринятая ею, пропорциональна площади отверстия, а сток ее происходит практически по всей поверхности. Таким образом, полостной вариант приемника открывает возможность значительного управляемого снижения равновесной температуры чувствительного элемента.

Описанные предпосылки реализованы в приборах с оптическими преобразованиями (рис. 3.26, 3.27), что позволило повысить уровень измеряемых потоков до 10^6 Вт·м⁻².

Если конические приемники используют для диагностики теплового состояния в топочных пространствах чувствительные элементы оберегают от непосредственного контакта со средой. Для этого применяется автормическая газовая завеса, причем газ, идущий

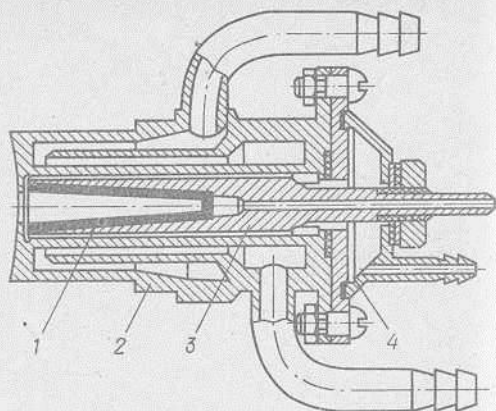


Рис. 3.26. Приемник с полостным чувствительным элементом:

1 - чувствительный элемент; 2 - водоохлаждаемый корпус; 3 - корпус чувствительного элемента

на завесу, предварительно работает как хладагент в системе охлаждения приемника. Состав и скорости ширмы-струи выбирают из условий минимизации потерь, вносимых ею в температурное и тепловое поле исследуемого объекта.

В энергетических установках, как правило, необходимо, измеряя суммарные тепловые потоки, разделять их на лучистый и конвективный. Для этого служит модификация приемника с диатермичной газовой завесой, изображенная на рис. 3.28.

Преобразователь теплового потока 2 смонтирован на торце охлаждаемой водой трубы 1. Через центральную часть трубы подводится воздух, образующий завесу на выходе из щели диатермичную завесу. При отсутствии завесы преобразователь регистрирует суммарный тепловой поток. При ее наличии горючие газы или флуоресцирующие газы непосредственно с теплоприемной поверхностью не контактируют, а, таким образом, конвективная составляющая отсекается. В то же время лучистый поток имеет беспрепятственный доступ к поверхности преобразователя, который регистрирует сигнал, пропорциональный его плотности. Завеса должна удовлетворять следующим требованиям: быть равномерно распределенной по ширине и высоте, иметь достаточную длину и скорость.

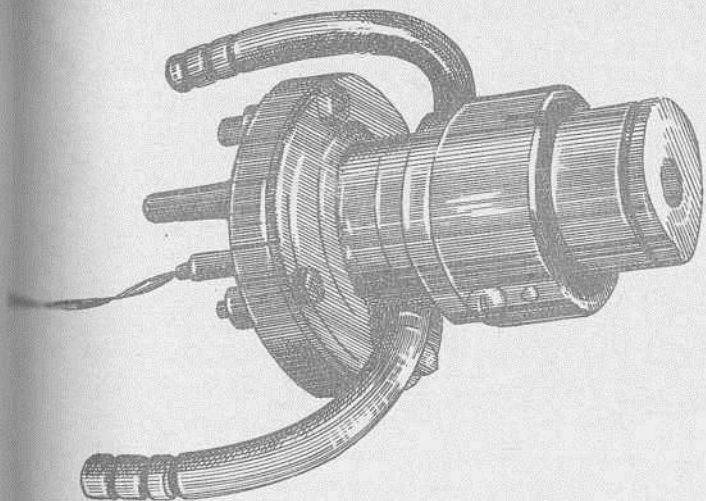


Рис. 3.27. Общий вид приемника с полостным чувствительным элементом

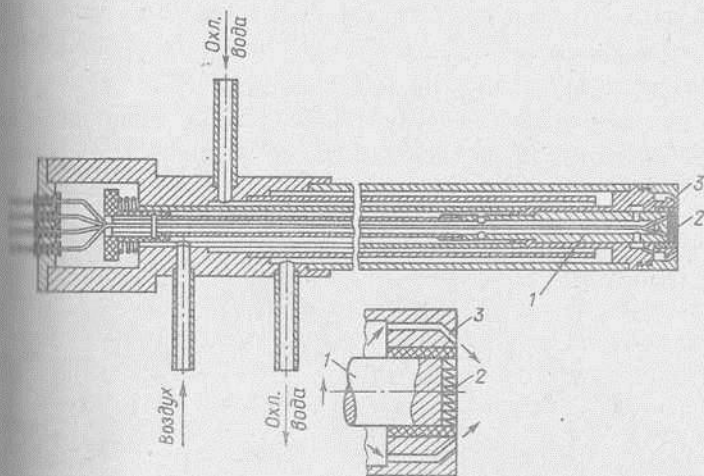


Рис. 3.28. Приемник-зонд с диатермической газовой завесой:

- 1 - система охлаждения; 2 - преобразователь;
3 - кольцевое отверстие

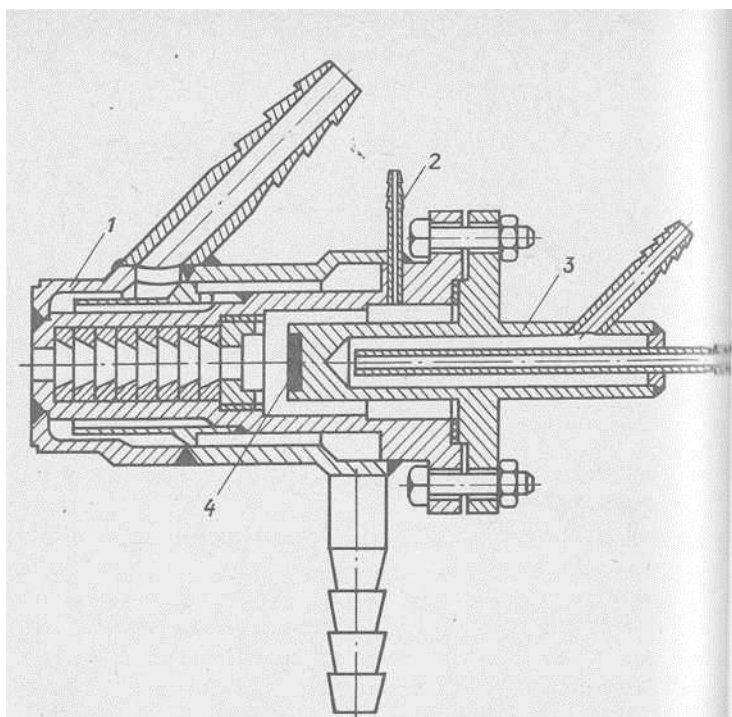


Рис. 3.29. Узкоугольный приемник:
 1 - охлаждаемый тубус; 2 - подвод газа на зам
 3 - корпус преобразователя; 4 - преобразователь.

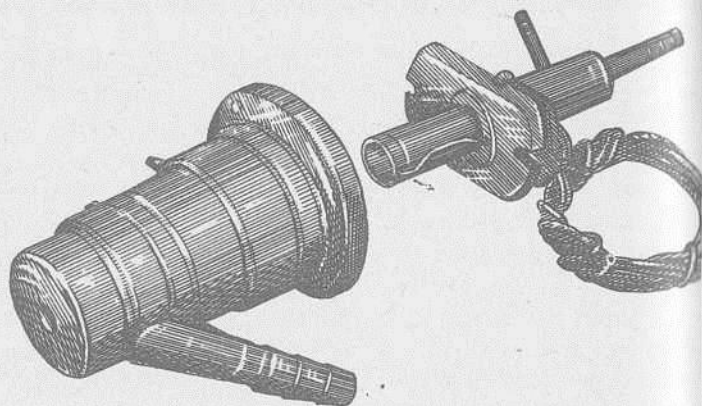


Рис. 3.30. Общий вид узкоугольного приемника

в щели, препятствовать осаждению частиц среды на поверхность преобразователя, не вносить существенных искажений в тепловой режим вблизи нее. Исследования, проведенные с целью определения оптимальных размеров щели и режимов отдува, показали, что перечисленным требованиям лучше других удовлетворяет щель шириной 1 мм с выходом газа под углом 45° к поверхности преобразователя. Для исключения конвективной составляющей скорость потока в завесе должна превышать скорость среды в топочном объеме не менее чем в три раза. Область возмущения потока горячих газов толки диатермичной завесой при этом распространяется на расстояние, равное не более 18 сантиметрам кольца завесы.

Высокая чувствительность теплотрических элементов позволила на их основе разработать конструкции узкоугольных приемников-зондов с диафрагменной оптикой. Прибор такого типа показан на рис. 3.29, 3.30.

Стремление к локализации измерений требует уменьшения телесного угла видения, повышение чувствительности предполагает его увеличение. Приемлемое решение достигнуто в приборе с диаметром отверстия 1 мм при длине тубуса 50 мм. Чувствительный элемент смонтирован на водоохлаждаемом торце корпуса, диафрагмирующее устройство так же охлаждается водой. Чтобы избежать образования налипающих слоев и нарушения конвективного теплообмена со средой, внутренняя полость тубуса может продуваться азотом. В промышленном использовании приемники показали значительные эксплуатационные преимущества, как неселективность восприятия лучистых потоков, нечувствительность к загрязнению и перегреву.

3.6. Интерферометрия. Голография.

Оптические методы визуализации течения потоков газов в последнее время находят широкое применение для определения их газодинамических и тепловых характеристик. Метод заключается в следующем. Если параллельный поток света проходит через слой газа, распределение освещенности среды связано с измене-

нием его оптической толщины, зависящей от распределения плотности газа. Изменения плотности приводят к отклонению падающих лучей и соответствующему волнообразному изменению освещенности в плоскости наблюдения. Эти изменения фиксируются на фотопленке.

Оптические методы имеют то преимущество, что при этом не нарушается нормальное течение газа. Их основной недостаток в том, что они применимы для плоских и в некоторых случаях осесимметричных потоков.

Различают следующие методы визуализации: теневой, шпирен-метод и интерферометрический.

Теневой метод удобен для наблюдения тепловых волн, поднимающихся от нагретого тела. Поскольку перераспределения освещенности, которое создается слоем газа заданной толщины, пропорционально второй производной его плотности по координате, отсчитываемой вдоль нормали к линии наблюдения, то теневой метод лучше применять для визуализации областей, которые характеризуются резкими изменениями картины течения.

В шпирен-методе изменение освещенности пропорционально градиенту плотности в исследуемой области. Он подразделяется на обычный шпирен-метод (метод Тейлора), дающий черно-белое изображение поля течения, и цветной.

Самый эффективный способ визуализации полей плотности и температур среды заключается в использовании метода интерферометрии. Интерференция непосредственно зависит от распределения плотности и поэтому интерферометрия позволяет дать качественную и количественную оценку поля плотности. Этим методом получают четкую картину распределения температуры в исследуемой области. К недостаткам метода следует отнести сложность юстировки прибора и трудности обработки результатов исследований. При правильной настройке интерференционные полосы получаются четкими, что дает косвенную информацию о полях температур.

Оптический метод визуализации был применен для исследования структуры среды между ограждением теплицы и энергосберегающим экраном из полимерной пленки, расположенном на расстоянии $h = 20; 60; 120$ мм. Кроме того, определялось влияние подпочвенного обогрева на характеристики среды между экраном и ограждением. Исследование проводилось с помощью прибора ИАБ-458. На интерферограммах (рис. 3.31), полученных при отсутствии подпочвенного обогрева, можно заметить, что расстояние между экраном и ограждением мало влияет на структуру исследуемой среды. Конвективные потоки наблюдаются лишь в верхней части рассматриваемого пространства. Они вызваны перетеканием воздуха из щели в пространство теплиц.

При наличии подпочвенного обогрева в нижней части воздушной среды наблюдаются конвективные токи, которые распространены на небольшую высоту (рис. 3.32). При этом видно, что теплота передается в основном путем теплопроводности через воздушный слой, расположенный между экраном и ограждением. Здесь структура среды мало зависит от значения h . Аналогичный результат получен при расчете процесса нестационарной теплопередачи из теплицы в окружающую среду при наличии энергосберегающего экрана. При решении конкретных задач рекомендуется устанавливать экран на расстоянии от ограждения 40... 60 мм.

Голография – метод интерферометрии, получивший распространение в последнее время и позволяющий воссоздать пространственную картину наблюдаемого явления. Метод воспроизводит интерференционную картину, образующуюся при наложении двух когерентных волн от лазерного источника света. На голограмме фиксируется волновая структура, возникающая при отражении лазерного излучения от исследуемого объекта.

С помощью голографии можно регистрировать нестационарные и изменяющиеся объекты. Кроме того, голограммы позволяют выделить элемент объекта. Голография дает возможность воспроизвести трехмерную картину течения.

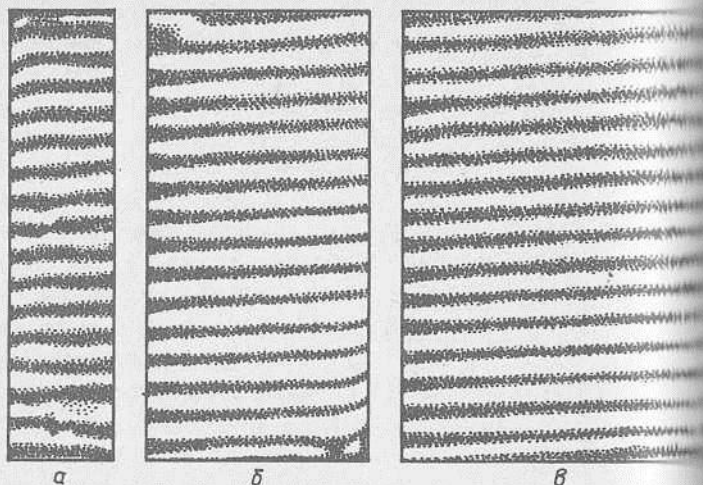


Рис. 3.31. Интерферограммы среды между ограждением теплицы и экраном при отсутствии подпочвенного обогрева для значений h_2 , мм: а) 20; б) 60; в) 120

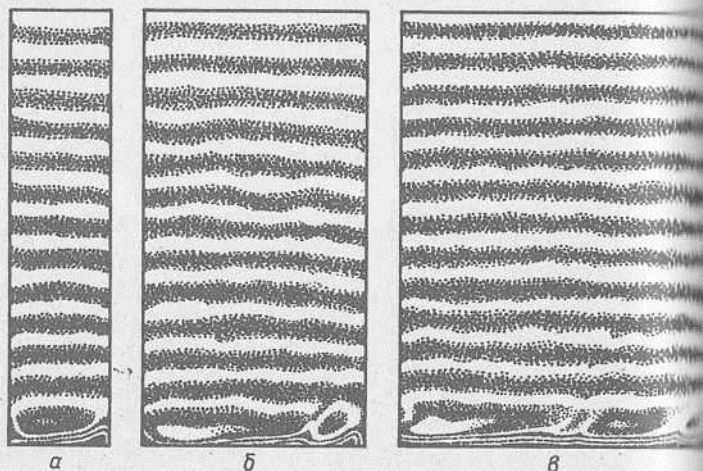


Рис. 3.32. Интерферограммы среды между ограждением теплицы и экраном при наличии подпочвенного обогрева для значений h_2 , мм: а) 20; б) 60; в) 120

Интерференционную картину на голограмме можно наблюдать, так и сфотографировать с разных сто-

4. ТЕПЛОМЕТРИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОМАССООБМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ И ПРОДУКТОВ

4.1. Метод циклов для комплексного определения ТФХ

Как показано в гл. 1, целесообразно при расчетах тепловых процессов в грунтах, ограждениях, продуктах реакцию на многообразные движущие силы учитывать в виде эффективных теплофизических характеристик (ТФХ) объекта. Для получения наиболее надежной информации об эффективных ТФХ необходимо разработать методы лабораторных исследований ТФХ при тепловых и температурных нагрузках, имеющих место в производственных процессах.

При расчете любого технологического процесса необходимо знать основные ТФХ грунта, сырья, полупродуктов, готового продукта, конструкционных и изоляционных материалов: теплопроводность λ , теплоемкость c или $c\rho$, температуропроводность a и теплоемкость b , а также энтальпию i . Все эти характеристики не являются для продуктов различных технологий свойствами в строгом понимании этого слова: к истинной теплопроводности добавляется диффузионная теплопроводность, лучеиспускание и конвекция, к теплоемкости — теплоты фазовых превращений и т.д. Поэтому вместо ТФС (теплофизические свойства) употребляют выражение ТФХ. Правомочность использования эффективных ТФХ вместо истинных ТФС в технологических расчетах обосновано в [64] с помощью анализа обобщенного уравнения Онзагера, члены релаксации в этом уравнении настолько малы в грунтах и большинства продуктов, что ни один из известных методов определения ТФХ не позволяющего измерить или учесть в теоретическом плане. Наиболее серьезно более серьезным допущением является

учет действия диффузионного термоэффекта, термобародиффузии, переноса парообразной влаги и т.п. и эффективных ТФХ. Например, теоретически возможен случай, когда перенос пара будет происходить навстречу потоку тепла [36].

Существует большое количество методов определения ТФХ грунтов, продуктов и материалов [23, 58, 61, 65], но они не удовлетворяют требованию, изложенному выше. На основе теплометрии можно разработать такие методы, поскольку создание и контроль тепловых и температурных нагрузок здесь не вызывают затруднений.

Для определения λ широкого диапазона материалов предложена модификация метода пластины [15], в которой все величины в уравнении для расчета

$$\lambda = qh/\Delta t \quad (4.1)$$

измеряются в стационарном режиме непосредственно и метрологически строго: q — по показаниям тепломера, который располагается в центре одной из поверхностей плоского образца, Δt — по показаниям дифференциальной термопары, спаи которой находятся в центре обеих поверхностей образца, а толщина образца h — индикатором. Использование принципа безтарейного тепломера позволило отказаться от громоздких охранных нагревателей или калориметров, сократить до минимума размеры образцов и время единичного опыта.

Лабильные материалы и продукты при тепловом воздействии, да и просто с течением времени могут менять свои ТФХ. С целью контроля неизменности за время опыта, а также отсутствия боковых утечек от образца, например за счет поперечных конвективных токов в образце, стали заделывать тепломерный прибор с обеих сторон образца [65]. Новая модификация метода пластины позволяет повысить надежность и повторяемость результатов определения λ : достаточно следить за равенством и неизменностью q_1 на входе и на выходе из образца. Это предложение внедрено и развивается в различных НИИ, например на кафедре мерзлотоведения МГУ при исследовании

важных дисперсных сред типа грунтов и биологических тканей [64].

Опыт работы с λ -приборами, имеющими тепломеры с обеих сторон плоского слоя, позволил предложить простой метод определения теплоемкости c и ρ , а также изменения энтальпии Δi [64]. Обе эти характеристики широко используются в тепловых расчетах технологических процессов; в поверочных расчетах их используют для определения количества тепла, пошедшего на проведение процесса $Q = cm\Delta t$, а в конструктивных расчетах — для определения производительности аппарата m с помощью этих же формул (количество тепла Q в этом случае определяют из уравнения теплопередачи).

Поскольку изменением давления продукта при его обработке почти всегда можно пренебречь, часто используют формулу $Q = m\Delta i = m(i_2 - i_1)$. Начало отсчета энтальпии i не имеет принципиального значения, наиболее употребительно $i = 0$ при 0°C .

Коэффициент теплопроводности λ лабильных продуктов обычно сильно зависит от температуры $\lambda = f(t)$, поэтому дифференциальное уравнение теплопроводности плоского слоя продукта, выраженное через изменение энтальпии, довольно сложно [64].

$$\rho \frac{\partial i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + q_v \quad (4.2)$$

Это можно упростить, воспользовавшись подстановкой Каргофа

$$\theta = \frac{1}{\lambda_1} \int_{t_1}^{t_2} \lambda dt, \quad (4.3)$$

где t_1 и t_2 — граничные температуры образца в опыте по определению i или c .

По существу, θ является потенциалом, градиент которого пропорционален тепловому потоку. Подставив (4.3) в (4.2) и проводя простейшие преобразования, получим

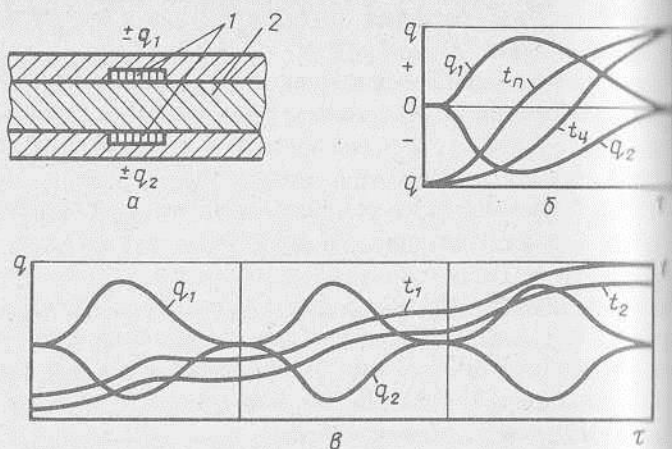


Рис. 4.1. Схема ТФХ-прибора (а), изменение q и t при разовом (б) и последовательном (в) определении ТФХ методом циклов

$$\frac{\rho}{\lambda_1} \frac{\partial i}{\partial \tau} = \nabla^2 \theta + \frac{q_v}{\lambda_1} \quad (4.1)$$

Метод локального калориметрирования двумя тепломерами 1 (рис. 4.1, а) позволяет получать однородное поле тепловых потоков и температур как в стационарном, так и в нестационарном режиме, например в переходном режиме после внезапного или плавного изменения мощности нагревателя либо температуры теплоносителя на одной из сторон образца 2. Проводя дальнейшее упрощение (4.4), заменяя объемную плотность теплового потока q , отнесенную к единице толщины слоя h , и учитывая фактическое накопление энергии в слое в виде суммы теплоточков с обеих сторон $q_1 + q_2$ (см. рис. 4.1), из (4.4) получаем расчетное уравнение

$$\Delta i = \frac{1}{h\rho} \int (q_1 + q_2) d\tau \quad (4.2)$$

Интеграл в этом выражении пропорционален площади, ограниченной кривыми $q_1(\tau)$ и $q_2(\tau)$

двумя равновесными состояниями (рис. 4.1,б), которые получаются из эксперимента непрерывной записью сигналов обоих тепломеров. Практически эта площадь определяется с точностью до 1% планиметрированием.

Начальный равновесный режим можно сделать нулевым, т.е. закладывать в прибор продукт либо пакет продуктом, предварительно выдержав его в воде с тонким льдом. Тогда площадь, замкнутая кривыми $q_1(\tau)$ и $q_2(\tau)$, характеризует не приращение, а теплоту продукта при конечной температуре опыта.

Для определения теплоемкости продукта определяем прирост средней температуры слоя за переходный режим $\delta\bar{t}$, при этом можно рассчитывать значение средней эффективной изобарной массовой теплоемкости $c = \Delta i / \delta t$ либо объемной теплоемкости $c\rho$:

$$c\rho = \frac{\int (q_1 + q_2) d\tau}{h \delta t} \quad (4.6)$$

Найденное значение c или $c\rho$ относим к среднеэнтальпийной температуре образца

$$\bar{t} = t_1 + \frac{\int (t_2 - t_1)(q_1 + q_2) d\tau}{2 \int (q_1 + q_2) d\tau}, \quad (4.7)$$

наиболее целесообразно при наличии в интервале $(t_2 - t_1)$ различных по величине источников или стоков тепла. Для простоты обработки и выявления каждого источника температуру можно снижать $(t_2 - t_1)$ до одной кельвина (чувствительность датчиков позволяет измерять все выходные данные без увеличения погрешности). В этом случае $t = (t_1 + t_2) / 2$.

Объединение описанных выше методов позволяет разработать и обосновать способ комплексного определения основных ТФХ лабильных материалов: λ , $c\rho$, α и β [64]. Суть нового способа сводится к заме-

не равновесных состояний в начале и конце каждого определения c или i стационарными режимами, которых можно определять λ , после чего не составляет труда рассчитать $a = \lambda / c\rho$ и $b = \sqrt{\lambda c\rho}$.

Способ является комплексным также в том смысле, что можно, если позволяет лабильность продукта, снимать температурную зависимость ТФХ для одного и того же образца без изменения его структуры и внешнего давления. Для этого начинают опыт, например, на самом низком уровне t . После установления стационарного режима, в результате которого по формуле (4.1) определяют первое значение λ (или c), затем увеличивают q_1 и t_2, q_2 сначала уменьшается, затем растет, но знак q_1 и q_2 одинаков на этом (рис. 4.1, в). Получаем первый переходный режим. Цикл заканчивается новым стационарным режимом. Новый переходный режим организуется на другом температурном уровне, при этом можно не выходить за пределы достаточно малых температурных перепадов на образце и т.д., что дает основание называть комплексный метод методом циклов. Формула (4.8) для расчета теплоемкости изменяется соответственно

$$c\rho = \frac{q \int (q_1 - q_2) dt}{h \delta t} \quad (4.8)$$

Точность расчета $c\rho$ по (4.8) остается столь же высокой, как и по (4.6) до тех пор, пока разность $(q_1 - q_2)$ не становится на всем протяжении переходного режима малой разностью двух больших величин. Этого можно избежать для любых продуктов подбором величин q и h .

Единственной платой за возможность определения четырех ТФХ вместо одной остается некоторое усложнение в подсчете δt , так как в начале и конце переходного режима температура образца не одинакова по высоте. Поэтому, рассчитывая $\delta t = \bar{t}_K - \bar{t}_H$, необходимо \bar{t}_H и \bar{t}_K определять с учетом $\lambda = f(t)$. Опыт показывает, что для большинства продуктов в узких пределах измерения t при единичном измерении $c\rho$

можно $\lambda = f(t)$ считать линейной: $\lambda = \lambda_0(1 + \beta t)$. Для этих условий получим

$$1 - \frac{\beta \lambda_0}{3qh} \left\{ \left(t_1 + \frac{1}{\beta} \right)^3 - \left[\left(t_1 + \frac{1}{\beta} \right)^2 - \frac{2qh}{\beta \lambda_0} \right]^{\frac{3}{2}} \right\} = \frac{1}{\beta} \quad (4.9)$$

Здесь все величины известны: q, h, t_1 - измерены; λ_0, β - расчетом, поскольку определение $ср$ сопровождается определением $\lambda = f(t)$. Поэтому уравнение (4.9) не представляет трудностей - алгоритм расчета t на ЭВМ несложен и одинаков.

Вместе с тем в большинстве случаев можно выбрать интервал δt достаточно малым, чтобы с большей точностью рассчитывать его как $\delta t = 0,5(\delta t_1 + \delta t_2)$.

Температуропроводность a и теплоусвоваемость при использовании комплексного метода рассчитываются (с учетом значений теплопроводности λ_H, λ_K) в начале и конце каждого переходного режима

$$a = \frac{\lambda_H + \lambda_K}{2c\rho}; \quad b = \sqrt{\frac{(\lambda_H + \lambda_K)c\rho}{2}} \quad (4.10)$$

Найденные величины ТФХ необходимо относить к средней температуре слоя за время опыта. Для отнесения коэффициента теплопроводности эта величина рассчитывается строго по (4.9), а в большинстве случаев - как $t = (t_1 + t_2)/2$.

При отнесении $ср, a$ и b также нет необходимости измерять непосредственно среднюю температуру или температуру в середине образца, достаточно измерить температуры на наружных его поверхностях [64].

4.2. Определение ТФХ в квазистационарном и нестационарном режимах

При определении ТФХ методом циклов (через образец все время протекает некоторое количество газа) сигналы термометров отличны от нуля. Регулировкой q_1 и q_2 можно добиться выполнения обобщенного условия регулярности теплового режима образца по А.В. Лыкову $135/q_1/q_2 = const$ и использовать закономерности регулярного режима для опреде-

ления ТФХ. Если поддерживать $q_1 = const$, то получим так называемый квазистационарный режим.

Значения q и t в любой точке образца (рис. 4.2) можно получить из уравнений

$$\frac{q(x, \tau)}{q_1} = \frac{x}{l} - \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{2}{\pi \cdot n} \sin(\pi n) \frac{x}{l} \exp(-\pi n Fo); \quad (4.11)$$

$$t(x, \tau) - t_H = \frac{q_1}{\lambda} \left[\frac{a\tau}{l} - \frac{l^2 - 3x^2}{6l} + l \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{2}{\pi^2 n^2} \cos(\pi n) \frac{x}{l} \cdot \exp(-\pi n Fo) \right]. \quad (4.12)$$

Начиная с некоторого момента времени $E_0 > Fo_0$, суммы в (4.11) и (4.12) становятся пренебрежимо малыми по сравнению с остальными членами. Для определения λ получим из (4.11) $q_2 = q_1 (l-h)/l$, а из (4.12)

$$\Delta t = t(l, \tau) - t(l-h, \tau) = \frac{q_1}{\lambda} \left(\frac{l^2 - (l-h)^2}{2l} \right)$$

и после комбинации этих выражений

$$\lambda = \frac{(q_1 + q_2)h}{2\Delta t}. \quad (4.13)$$

Для определения $ср$ запишем (4.12) для двух моментов времени τ_1 и τ_2 и произведем вычитание

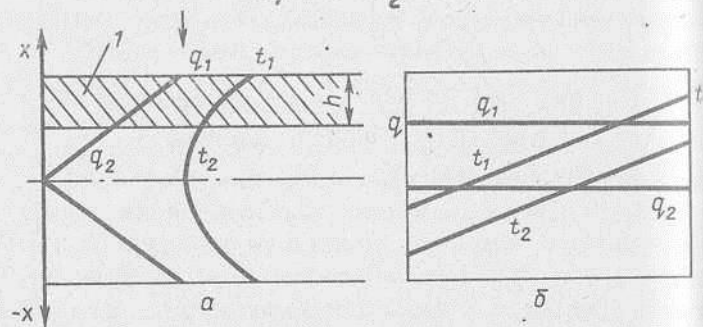


Рис. 4.2. Эпор (а) и изменение во времени q и t (б) в квазистационарном режиме

$$\delta t = t(l, \tau_2) - (l, \tau_1) = \frac{q_1}{\lambda} \left(\frac{a\tau_1}{l} - \frac{a\tau_2}{l} \right), \quad (4.14)$$

используя подстановку $q_2 = (q_1 - q_2)l/k$, получим

$$c\rho = \frac{(q_1 - q_2)(\tau_2 - \tau_1)}{k\delta t} = \frac{q_1 - q_2}{u k}, \quad (4.15)$$

где $u = \delta t / (\tau_2 - \tau_1) = \partial t / \partial \tau$ — скорость изменения температуры, одинаковая и постоянная в квазистационарном режиме (рис. 4.2, б). Остальные ТФХ получаются из известных соотношений $a = \lambda / c\rho$ и $b = \sqrt{\lambda c\rho}$. Для температуры отнесения пригодны рассуждения, приведенные в 4.1.

Расчетные формулы, аналогичные (4.13) и (4.15), получены также для несимметричного обогрева образцов.

Новый метод позволяет получать температурные зависимости ТФХ быстрее, чем метод циклов, а погрешности измерений могут оставаться на том же уровне, если в исследуемом диапазоне температур нет значительных фазовых превращений. Поскольку реализуются оба метода на одних и тех же установках, целесообразно комбинировать их или проходить весь диапазон температур обоими методами. Оба метода широко применяются при исследовании ТФХ самых разнообразных продуктов и материалов (кроме материалов с очень высокими λ), из которых можно сформировать плоский образец.

Грунт и крупногабаритные продукты или ограждения целесообразно рассматривать не как пластину, а как полуграниченный массив. В этом случае теплометрический подход также дает некоторые преимущества по сравнению с другими методиками. При этом решение задачи об измерении λ и a массива 1 (рис. 4.3, а) с помощью полусферического тела с большими λ и a , на поверхности которого нанесен первичный преобразователь теплового потока температуры ϑ_3 , а с противоположной стороны нанесена изоляция 4 [6]. Это тело предварительно выдерживается при температуре ϑ_0 и затем приводится в движение 1.500к

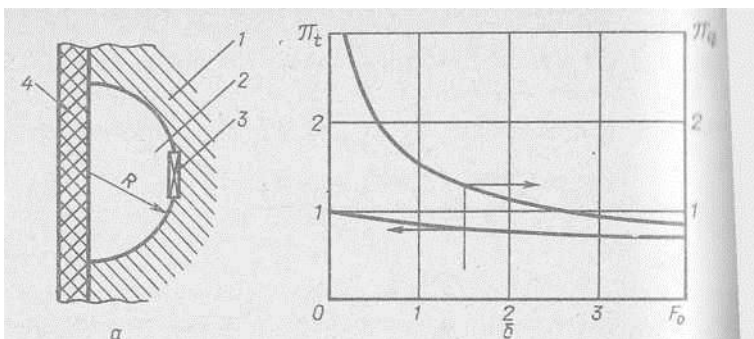


Рис. 4.3. Схема измерения (а) ТФХ массива и номограмма безразмерных q и $t(\delta)$

соприкосновение с испытуемым массивом. Изменение температуры массива t после соприкосновения описывается уравнением теплопроводности

$$\frac{\partial t(r, \tau)}{\partial \tau} = a \left[\frac{\partial^2 t(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \right] \quad (4.16)$$

при граничных условиях

$$t(R, \tau) = \vartheta(\tau); \quad q(R, \tau) F = c \frac{\partial \vartheta(\tau)}{\partial \tau}. \quad (4.17)$$

Решения (3.16) для безразмерных t и q на границе двух тел

$$\mathcal{F}_t = \frac{\beta}{\beta - \alpha} \exp(\beta^2 a \tau) \operatorname{erfc}(\beta \sqrt{a \tau}) - \frac{\alpha}{\beta - \alpha} \exp(\alpha^2 a \tau) \operatorname{erfc}(\alpha \sqrt{a \tau}); \quad (4.18)$$

$$\mathcal{F}_q = \frac{R}{\sqrt{\pi a \tau}} + \alpha(\alpha R - 1) \exp(\alpha^2 a \tau) \operatorname{erfc}(\alpha \sqrt{a \tau}) - \beta(\beta R - 1) \exp(\beta^2 a \tau) \operatorname{erfc}(\beta \sqrt{a \tau}), \quad (4.19)$$

где $\mathcal{F}_t = t(R, \tau) / \vartheta_0$, $\mathcal{F}_q = qR / (\lambda \vartheta_0)$, α и β — константы.

Для упрощения анализа (4.18) и (4.19) воспользуемся их асимптотическим разложением по степени безразмерного времени - числа Фурье $F_0 = \frac{a\tau}{R^2}$

$$\mathcal{Y}_t = 1 + A_1 F_0^{0,5} + A_2 F_0 + A_3 F_0^{1,5} + \dots ; \quad (4.20)$$

$$\mathcal{Y}_q = B_0 + B_1 F_0^{-0,5} + B_2 F_0^{0,5} + B_3 F_0 + B_4 F_0^{1,5} + \dots (4.21)$$

Для малых времен τ и для всего диапазона ТФХ (пески, грунты, пищевых продуктов и изоляционных ограждений) это быстро сходящиеся ряды. В безразмерные коэффициенты A_i и B_i входят поверхность контакта A , интегральная теплоемкость пробного тела и ТФХ испытываемого массива. Решения (4.20) и (4.21) протабулированы для удобства практического использования и в таблицах построены графики (рис. 4.3,б).

Если выбрать по графику \mathcal{Y}_t отношение температуры в моменты времени τ_1 и τ_2 так, чтобы $\Delta F_0 = 1$ (при $F_0 = a\tau/R^2 > 1$), то температуропроводность определяется из простого соотношения

$$a = \frac{R^2}{\tau_1 - \tau_2} \quad (4.22)$$

Для определения λ используется второй график (рис. 4.3,б) и два значения измеренных тепловых потоков в разные моменты времени

$$\lambda = \frac{q(\tau_2) - q(\tau_1)}{\mathcal{Y}_{q_1} - \mathcal{Y}_{q_2}} \cdot \frac{R}{\sigma_0} \quad (4.23)$$

Два различных замера потока желательно производить, чтобы избежать погрешности, которая может возникнуть из-за неточности в фиксировании начала процесса.

4.3. Блочный принцип ТФХ-приборов

Сырье, продукты и материалы, с которыми имеет дело при проведении тепловых процессов в различных отраслях сельского хозяйства и промышленности, весьма разнообразны по консистенции, лабильности, разнообразен и диапазон температур, в которых ведут эти процессы. Поэтому при создании ТФХ-приборов приходится учитывать, с одной стороны, требования к их универсализации, чтобы с помощью одного устройства охватить исследованием возможно большее число материалов, а с другой стороны – к их специализации, чтобы добиться максимальной точности измерений, простоты в обслуживании прибора.

Совмещение этих требований возможно, если использовать блочный (модульный) принцип конструирования ТФХ-приборов, т.е. создать набор блоков, из которых можно "складывать" приборы для разных температурных и тепловых нагрузок, разных по консистенции продуктов. Такой принцип был заложен в конструкции первых теплометрических λ -приборов [15].

Всякий теплометрический ТФХ-прибор состоит из трех основных блоков (рис. 4.4) – блоков подвода и отвода тепла и измерительного блока. Блоки подвода и отвода тепла, в свою очередь, могут быть зачастую взаимозаменяемы, поскольку служат для одной и той же цели – обеспечить по заданной программе изменение плотности теплового потока через образец и температуры образца.

В соответствии с этой целью в плоских ТФХ-приборах блоки подвода и отвода тепла выполняются в виде коротких цилиндров-дисков, прилегающих к образцу с обеих сторон. Поверхности прилегания являются изотермичными.

В блоках подвода тепла применяются три типа источников энергии: термостатируемая камера ТК, электронагреватель Э, инфракрасный источник ИК. Для блоков отвода тепла используются три типа стоков – термостатируемая камера ТК, термостатируемая пластина ТП и термоэлектрический (полупроводниковый) термостат ТЭ. Комбинация различных блоков подвода и отвода тепла еще больше расширяет диапазон конст-

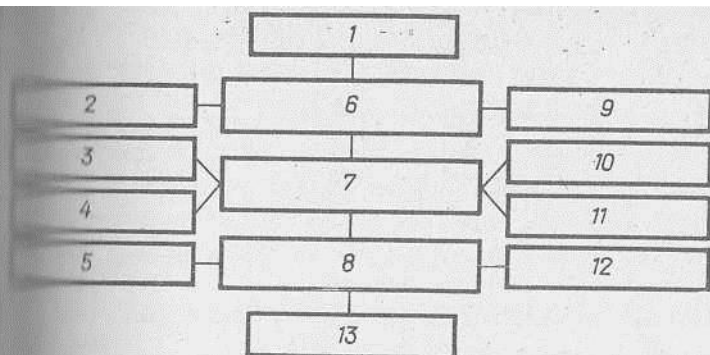


Рис. 4.4. Блок-схема приборов для измерения ТФХ

ных ТФХ-приборов. Широко применяются комбинации ТК-ТК и Э-ТК, обеспечивающие высокую точность измерений, но в сравнительно узком диапазоне температур. Варианты ТК-ТП и Э-ТП значительно расширяют температурные пределы измерений, но делают более сложным обслуживание установки. Приборы с ИК-ТК и ИК-ТП применяются для исследования теплопроводных материалов и когда нужно создать прямоугольный импульс по тепловой нагрузке на образец и т.д.

Измерительный блок включает в себя устройство для формирования слоя образца и для измерения его толщины, плотности теплового потока и температуры на поверхностях образца. Если необходимо исследовать влияние механических нагрузок на образец, то его можно дополнить устройством для создания и измерения этих нагрузок.

Остальные блоки ТФХ-прибора (рис. 4.4) — питания, термостатирования, регулирования, измерения и регистрации сигналов первичных преобразователей — являются комплектующими изделиями серийного производства и подбираются для каждого основного блока всей системы в соответствии с условиями конкретной задачи.

4.4. Установки для исследования твердых, жидких и пастообразных объектов и продуктов

Первая лабораторная установка по теплотрическому определению теплопроводности твердых материалов в блочном варианте Э-ТК была создана в 1961 году [157], опыт ее эксплуатации был положен в основу Л-приборов, серийно изготавливаемых Институтом проблем энергоснабжения АН УССР. Для первых ТФХ-приборов, позволяющих определять λ , $c\rho$, Δi и δ лабильных продуктов, мы использовали варианты ТК-ТК, Э-ТК и Э-ТП. В КТИПП изготовлена малая серия приборов ТК-ТК для работы в интервале температур 10...100°C (рис. 4.5) [647]. Верхняя и нижняя камеры из нержавеющей стали диаметром 120 мм подключаются к разным термостатам. Верхняя камера удерживается тремя подпружиненными микрометрическими устройством, с помощью которых устанавливается параллельность поверхностей слоя продукта и его толщина. На рабочие поверхности тепловых блоков наклеены пластины измерительного блока, в центре которых сформованы базовые тепломассометрические элементы специально так подобранные, чтобы их рабочий коэффициент k был одинаков и составлял 40...60 Вт/(м²·с). Поверх базовых элементов наклеены МК-термопары сваренные встык и раскатанные до толщины 0,05 мм. Вся установка после закладки образца между камерами закрывается изоляционным кожухом из вспененного полистирола.

В приборах с двумя термостатированными камерами неважно, как пропускать через них теплоноситель. Для простоты дальнейших рассуждений положим, что термостаты имеют насосы одинаковой производительности m , а теплоемкости теплоносителя равны c (при температурах 40...95°C обе камеры пропускают воду, и эти предложения выполняются автоматически), Плотность теплового потока на расстоянии x от края камеры (рис. 4.6)

$$q_x = k(t_1 - t_2)_x = -mc \frac{dt_1}{dA} = mc \frac{dt_2}{dA}. \quad (4.24)$$

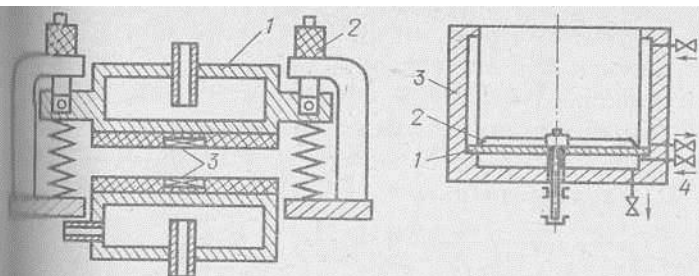


рис. 4.5. Схема ТФХ-прибора с термостатируемыми камерами

Положив коэффициент теплопередачи k постоянным, рассмотрим изменение $(t_1 - t_2)$ по координате x (A), для это принято в теории теплообменных аппаратов.

Для прямотока (рис. 4.6, а)

$$d(t_1 - t_2)_x = -\frac{2k}{mc} (t_1 - t_2)_x dA$$

$$\frac{d(t_1 - t_2)_x}{(t_1 - t_2)_x} = -\frac{2k}{mc} dA; \int_{(t_1 - t_2)_x}^{(t_1 - t_2)_H} \frac{d(t_1 - t_2)_x}{(t_1 - t_2)_x} = -\frac{2k}{mc} \int_0^F dA;$$

$$(t_1 - t_2)_x = (t_1 - t_2)_H \exp\left(-\frac{2kA}{mc}\right).$$

Аналогично, для прямотока

$$\gamma_x = k(t_1 - t_2)_H \exp\left(-\frac{2kA}{mc}\right), \quad (4.25)$$

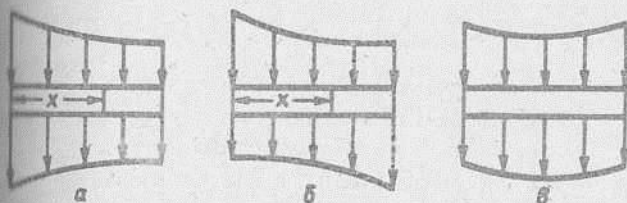


рис. 4.6. Эпюры плотности теплового потока через прибор в ТФХ-приборе с термостатируемыми камерами

т.е. плотность теплового потока уменьшается вдоль поверхности теплопередачи и скорость его уменьшения зависит от толщины образца и его λ , т.е. q зависит от термического сопротивления, а это усложняет использование метода и прибора.

Для противотока (рис. 4.6,б)

$$d(t_1 - t_2)_x = \left(\frac{1}{mc} - \frac{1}{mc} \right) (t_1 - t_2) dA = 0,$$

следовательно,

$$q_x = k(t_1 - t_2)_x = const. \quad (4.20)$$

Как видно из рис. 4.6,б, при противотоке остается нежелательное падение температуры вдоль датчика теплового потока. Наиболее близкими к горизонтальным плоскостям в месте измерений будут изотермы, если для верхней камеры теплоноситель подводить с края, а отводить в центре, для нижней – наоборот (рис. 4.6,в). Реализация этих рекомендаций, а также установка простейших закручивающих поток устройств привели к практически равномерному полю температур и тепловых потоков в пластинах измерительного блока на площадках диаметром не менее двух базовых элементов, что было экспериментально установлено закладкой дополнительных элементов в пластины.

Приборы ТК-ТК использовались для опеределения ТФХ самых разнообразных продуктов, полуфабрикатов и сырья. При толщине образцов 3...12 мм и тепловой нагрузок 10...100 Вт/м² погрешность измерения ТФХ не превышает: по λ – $\pm 3\%$, по $c\rho$ – $\pm 5\%$, по a и μ – $\pm 7\%$.

В качестве стационарного лабораторного ТФХ-прибора с блоками Э-ТК используется усовершенствованный λ -прибор с двумя пластинами измерительного блока [64]. Он оборудован всем необходимым для комплексного измерения ТФХ продуктов разной консистенции. На этом приборе определяют зависимость ТФХ от механической нагрузки. Он имеет те же характеристики, что и описанный выше прибор, но в

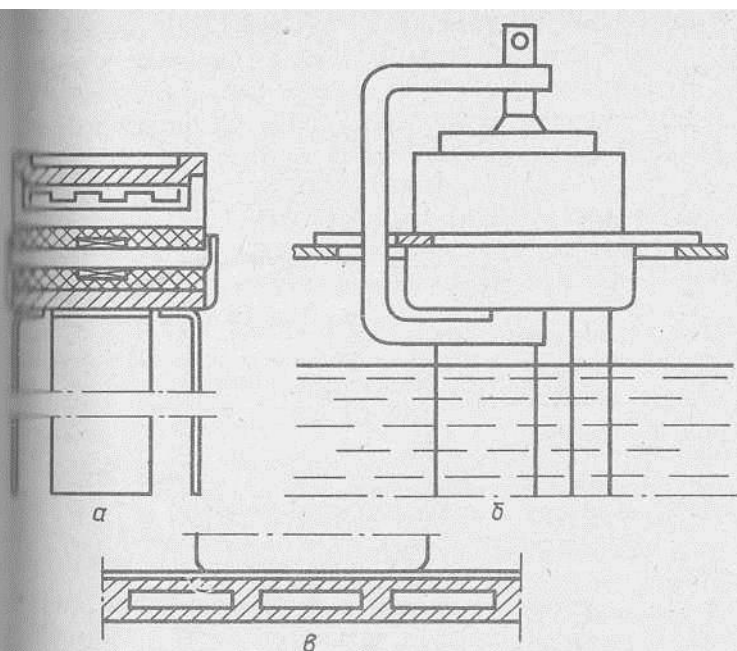


Рис. 4.7. Конструкции ТФХ-приборов

Поскольку диаметр камеры равен 100 мм, максимальная толщина слоя составляет 10 мм.

Еще меньше рабочий диаметр плит у портативного ТФХ-прибора – 75 мм (рис. 4.7,а). Он работает по схеме Э-ТП или Э-ТК. В верхней плите заделан электронагреватель, к нижней прикреплены медные ребра. Этими ребрами пользуются для отвода тепла от образцов, помещая их непосредственно в термостат (рис. 4.7), прикрепляя к испарителю холодильного агрегата (рис. 4.7,в) или вставляя в сосуд Дьюара с жидким азотом. Таким образом исследуют ТФХ продуктов при высоких и низких температурах. Толщина образцов для портативного прибора – 1...5 мм, ее фиксируют с помощью двух вкладышей из фторопласта. Такую же схему имеют ТФХ-приборы, специально изготовленные для исследования термолabileльных продуктов в широком диапазоне температур. Они снабжены блоками Э-ТП или Э-ТЭ диаметром 100...150 мм и были использованы

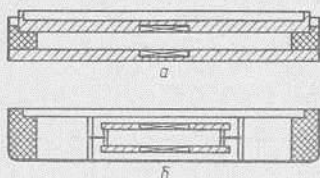


Рис. 4.8. Схема закладки тепломеров и эпоры тепловых потоков в образце

при исследовании ТФХ молочных и мясных продуктов $\lambda_{\text{ВО}}$, имеющих весьма сложные фазовые переходы.

Для лабильных продуктов измерительный блок изготавливается в виде кассет двух типов (рис. 4.8). Кассета „а“ состоит из дисков с измерительными элементами, нижний диск имеет кольцевой борт. При помощи кассеты с образцом между тепловыми блоками контактные сопротивления устраняются с помощью сокотеплопроводной вакуумной смазки.

В кассете „б“ жидкий или пастообразный продукт окружает измерительные элементы со всех сторон. Часть продукта, размещенная между элементами, служит собственно образцом, а прослойки между элементами и тепловыми блоками обеспечивают равномерный подвод и отвод тепла. Толщину образца здесь можно регулировать сменой пластмассовых шпилек, которые соединяют элементы. Применение съемных кассет дает возможность вынимать образец из приборов для термической обработки без нарушения структуры, исследовать в заданном режиме несколько образцов в одном приборе.

Теоретические основы измерения ТФХ требуют равномерности тепловых потоков через образец, поэтому все три типа измерительных блоков были исследованы с помощью миниатюрных базовых элементов, которые закладывали по радиусу в центральный слой образца. Полученные эпюры плотности теплового потока (на

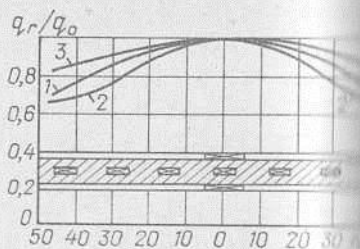


Рис. 4.9. Кассеты измерительного блока ТФХ-прибора

4.9 показаны обобщенные по нескольким опытам данные: 1 - для несъемного измерительного блока; 2 - для кассеты, рис. 4.8,а; 3 - для кассеты, рис. 4.8,б) дают основания к предпочтению кассеты "б": она имеет зону достаточной одномерности ($q_r/q_0 \geq 0,5$) радиусом $0,5R$. Несъемный измерительный блок и кассета "а" также вполне пригодны для исследования, их радиусы одномерности равны соответственно $0,35$ и $0,28R$, т.е. как минимум вдвое больше радиуса базового элемента.

4.5. Установки для определения ТФХ зерновых продуктов

Если требуется определить эффективные ТФХ насыщения зерна, грунта или продуктов крупнозернистой структуры, то нужно брать слишком большую толщину образца, чтобы пренебречь влиянием пристенных слоев, и исключить это влияние. Второй путь предпочтительнее, поскольку первый путь свел бы на нет основное преимущество теплотметрических методов определения ТФХ: скоростные измерения при тепловых и температурных нагрузках, которым объект подвергается в естественных условиях или технологических аппаратах.

Основная идея второго пути состоит в проведении измерений на двух образцах разной толщины. В стационарном режиме для каждого образца можно записать

$$\frac{\Delta t_i}{q_i} = \frac{h_i}{\lambda} + R_{pi}; \quad i = 1; 2. \quad (4.27)$$

где в R_{pi} включено дополнительное термическое сопротивление пристенных слоев по сравнению с нормальной засыпкой той же толщины, а также балластное сопротивление измерительного блока. Обеспечив равенство $R_{p1} = R_{p2}$ за счет одинаковой равномерной загрузки продукта в кассеты обоих измерительных блоков, получим из системы (4.27) расчетное уравнение

$$\lambda = (h_1 - h_2) \left(\frac{\Delta t_1}{q_1} - \frac{\Delta t_2}{q_2} \right)^{-1}. \quad (4.28)$$

При использовании ТФХ-приборов с блоками ТК-1 подключенными к одним и тем же термостатам, или спаренного ТФХ-прибора с одним блоком подвода и двумя блоками отвода тепла, и при условии $h_1 = 2h_2$ получаем упрощенное уравнение [64]

$$\lambda = \frac{h_2 q_1 q_2}{\Delta t (q_1 - q_2)}. \quad (4.29)$$

Здесь принята $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t$ одинаковой для обоих слоев разности температур между тепло- и хладосителем.

Подобные рассуждения можно провести и в отношении объемной теплоемкости насыпи

$$(c\rho)_i = \frac{Q_i}{h_i \delta t_i} + (c\rho)_{ni} - (c\rho)_{Bi}; \quad i=1; 2. \quad (4.30)$$

Здесь под Q_i подразумевается интеграл от $q_1 - q_2$ для переходного режима каждого из образцов, $(c\rho)_{ni}$ — это дополнение к теплоемкости насыпи за счет того, что в пристенном слое укладка частиц менее плотна, чем в насыпи, $(c\rho)_{Bi}$ — балластная теплоемкость ТФХ-прибора. Пользуясь теми же рассуждениями, что и при выводе (4.29), получаем [64]

$$c\rho = \frac{Q_1 - Q_2}{h_2 \delta t}. \quad (4.31)$$

Температуру отнесения при этом рассчитывают так же, как и при работе с одним образцом (см. гл. 2).

Особенностью ТФХ-приборов для исследования новых материалов является вертикальное расположение тепловых и измерительных блоков, чтобы при равномерной засыпке материала (проверяется по одинаковости насыпной плотности образцов) быть уверенными в одинаковых сопротивлениях и емкостях пристенных слоев. На рис. 4.10 представлена конструкция одного из таких приборов ТК-ТК. Измерительные блоки выполнены пластинами с вмонтированными в них базовыми элементами, отверстия в которых залиты эпоксидной смолой, и обечайками, высота которых определяет толщину образцов. В обечайках имеются отверстия для загрузки и выгрузки образцов.

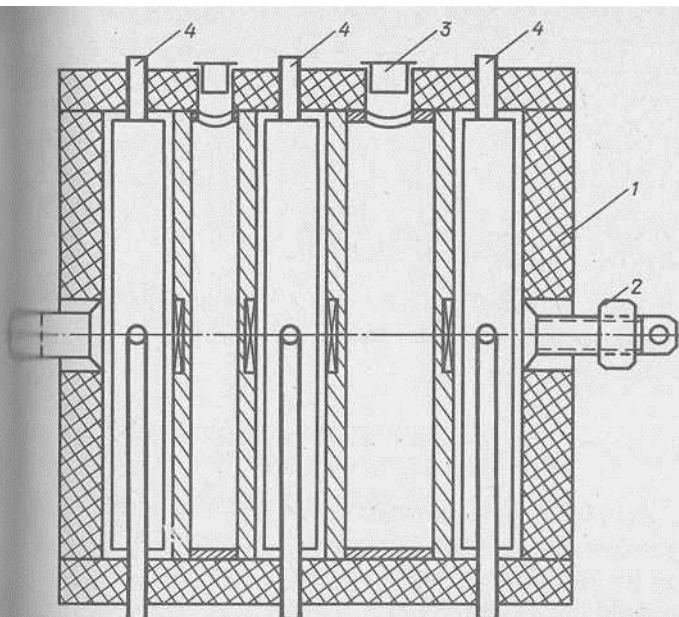


рис. 4.10. Прибор для измерения ТФХ зерновых материалов:

1 - теплоизоляция; 2 - трубочина; 3 - отверстия для засыпки образца; 4 - к термостату

Базовые элементы и термодары, вмонтированные в их поверхностях, обращенных к тепловым блокам (чтобы можно было пользоваться уравнениями 4.29 и 4.31), во всех четырех пластинах идентичны по своим характеристикам. Тепловые блоки укомплектованы двумя ультратермостатами, позволяющими поддерживать заданные тепловые и температурные нагрузки на образцы.

Обычно стационарный режим поддерживается при $T = 5...7$ К, его возмущение производят одинаково направленным изменением температуры в термостатах (рис. 4.11) на один и тот же интервал, при этом для обоих образцов получается в точности одинаковым. Переходя в следующем цикле на новый температурный уровень, получаем температурную зависимость для всех ТФХ, а если в следующем цикле вер-

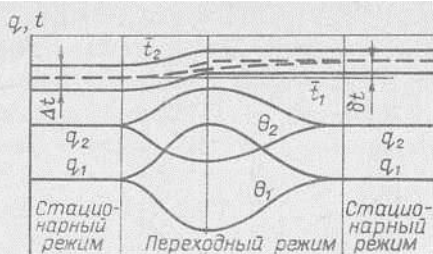


Рис. 4.11. Зависимость q, θ, t от δt во времени измерения ТФН новых продуктов в томод циклов

нуться к исходному уровню, то получим временную зависимость, что актуально для лабильных зерен продуктов.

4.6. Теплометрические оболочки и калориметры

Приборы, применяемые для исследования тепловых эффектов в грунтах, изоляции, а также в продуктах при их обработке или хранении, обычно громоздки и инерционны. При этом определить можно лишь качественно тот или иной эффект (плавление или кристаллизацию отдельных фракций и т.п.). Инерционность подобных приборов существенно снижается, если изменить технологию универсальных базовых тепломеров для создания тепломерной оболочки, окружающей образец в виде короткого цилиндра [65] или куба. Для цилиндрического микрокалориметра (рис. 4.11) ленточка, идущая на изготовление базовых тепломеров навивается винтообразно (слой к слою с тонкой и слойкой эпоксидной смолы) на фторопластовый стержень ϕ 6 мм с конусностью 1:50. Места перехода от константана к биметаллу при этом располагаются поочередно на внутренней и внешней поверхности ленточки. К снятому со стержня цилиндру приклеивается доньшко и присоединяется крышка, тоже содержащая базовые элементы. Крышка, цилиндр и доньшко склеиваются последовательно, так что оболочка практически на 100% (за исключением отверстия для термометра ϕ 1 мм в крышке) состоит из теплометрических элементов. Градуировка приборов производится при измерении джоулева тепла в микросопротивлении, зависящего от температуры.

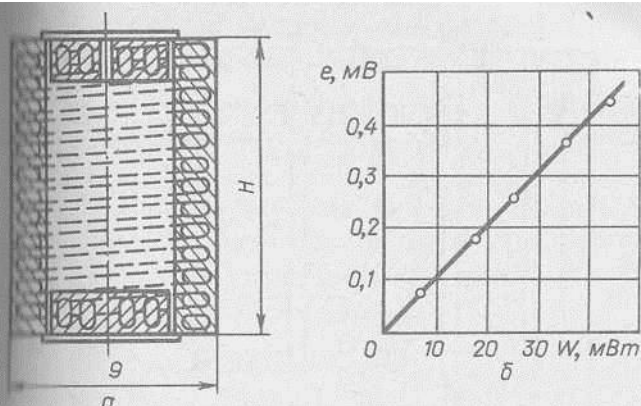


рис. 4.12. Схема теплотрической оболочки /а/ градуировочная кривая для нее /б/

находимся в цилиндре. На рис. 4.12,б представлены результаты градуировки микрокалориметра с $h = 28$ мм (можно менять от 9 до 30 мм). В соответствии с теорией учета внутреннего тепломассопереноса в продуктах тепловые эффекты можно вводить в ТФХ, которые для описанных конструкций рассчитываются по формулам

$$\Delta l = \frac{1}{m} \int Q d\tau; c = \frac{\Delta l}{\delta t}; c_p = \frac{1}{V \delta t} \int Q d\tau, \quad (4.32)$$

Q — тепловой поток через оболочку.

Кубические микрокалориметры изготавливаются путем склеивания одинаковых квадратных базовых элементов.

Точность измерения тепловых потоков возрастает, если использовать известную дифференциальную схему измерения в данном случае двух одинаковых оболочек, одной из которых находится эталонное вещество.

Подобная схема применяется и в калориметрах, где в качестве чувствительных элементов используются жидкие тепломеры, связанные с металлическими элементами-оболочками тепловыми шунтами [8].

Опыт в создании и эксплуатации описанных устройств позволил разработать дифференциальный микрокалориметр (рис. 4.13) с чувствительными элементами, изготовленными по описанной в п. 2.7 техно-

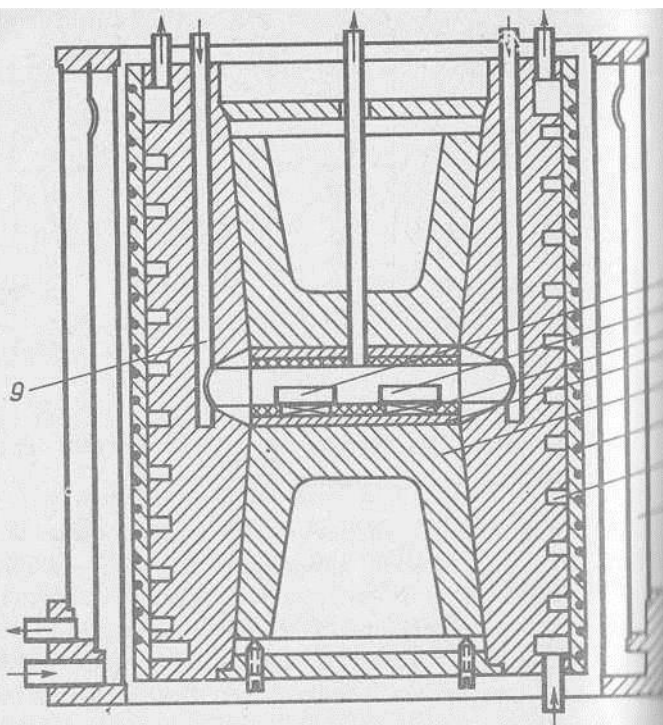


Рис. 4.13. Схема дифференциального калориметра
 1, 2 - кюветы; 3 - тепломеры; 4 - температурно
 равнивающая пластина; 5 - конус; 6 - нагреватель
 7 - канал хладоносителя; 8 - рубашка; 9 - канал
 для регулирования газовой среды

логии. Два элемента (один - для образца, другой - для эталона) закреплены на торце теплопроводного массивного конуса методом "теплового удара", что обеспечивает минимальную инерционность измерительного блока. Наличие электронагревателя, навитого на верх корпуса прибора, и трех систем каналов для тепло- и хладоносителей позволяет определять тепловые эффекты в диапазоне температур от -180 до $+120$. Прибор используется для исследования биопрепаратов и мясopодyктов, подвергающихся криогенной, холодильной и тепловой обработке [64].

4.7. Методы и установки определения испарительной способности

Как показано в первой главе, использование испарительной способности $\epsilon_{и} = \beta_{пр} / \beta_{в}$ в качестве характеристики грунтов, сырья или продуктов, подверженных термической обработке в газовой среде, упрощает расчет теплообмена в этих условиях. Основные характеристики теплообмена q и j при этом рассчитываются по формулам

$$q = \alpha(t_n - t_0) + \epsilon \sigma T_n^4 - A q_{плд} + r \epsilon_{и} \beta_{в} (P_n - P_0) \quad (4.33)$$

$$j = \epsilon_{и} \beta_{в} (P_n - P_0), \quad (4.34)$$

где $q_{плд}$ — плотность падающего лучистого потока; A — поглощательная способность поверхностного слоя; $\beta_{в}$ — коэффициенты массоотдачи с поверхности продукта и воды для одинаковых условий.

Упрощение расчетов состоит в том, что появляется возможность использовать информацию о величине коэффициента массоотдачи при испарении воды с открытой либо с обильно смоченной поверхности $\beta_{в}$ (табл. 4). Величина $\epsilon_{и}$ при этом приобретает смысл аналога терморadiационных характеристик поверхности продукта: степени черноты (относительной излучательной способности) ϵ и поглощательной способности A . Некоторая неопределенность толщины поверхностного слоя не должна препятствовать введению новой характеристики $\epsilon_{и}$, так как и для расчетов лучистого теплообмена при обработке различных продуктов используют ϵ и A , хотя процессы поглощения и отражения происходят по толщине некоторого слоя. Наши опытные данные показывают, что при охлаждении мяса изменение влажности происходит на глубине 3-5 мм, в других работах эта величина оценивается 1-5 мм. Для различных случаев это может быть толщина кожуры фруктов, корки хлеба и т.п.

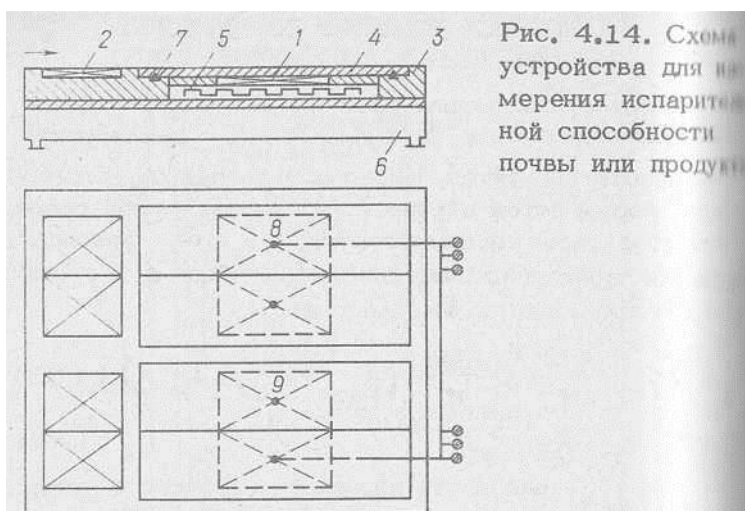


Рис. 4.14. Схема устройства для измерения испарительной способности почвы или продукта

Отметим, что последнее слагаемое в (4.33) является равноправным членом теплового баланса продукта при его обработке и должно учитываться с точки зрения экономии энергии, а (4.34) характеризует усушку продукта, т.е. изменение его количества и качества. Поэтому накопление информации об испарительной способности различных продуктов, сырья и материалов является актуальной задачей. Приведем описание устройства для измерения $\mathcal{E}_и$ в условиях вынужденной конвекции воздуха в диапазоне скоростей $2...7$ м/с, температур – минус $30... плюс 100^{\circ}\text{C}$ (рис. 4.14) [64].

Двойные проницаемые тепломеры 1 и одинарные сплошные тепломеры 2 располагаются на общей плате 3, одинарные тепломеры – заподлицо с ее поверхностью, а двойные углублены на 3 мм с таким расчетом, чтобы их секции можно было покрывать слоем 4 испытуемого материала или эталона. Через отверстия в каждой секции имеет индивидуальную подпитку воды. Электронагреватели 5 и проточные камеры 6, включенные в цепь отдельных термостатов, позволяют задавать для каждого спаренного тепломера нужную тепловую и температурную нагрузку.

Поверхностная пленка или тонкий слой исследуемого грунта или продукта закрепляются на обеих

них одного из тепломассомеров с помощью тонких шпилек 7 так, чтобы обеспечить надежный контакт блока и чувствительных элементов. Температура нажной поверхности продукта измеряется с помощью термомпары 8, спай которой закладывается или "вшивается" в продукт несколькими стежками длиной 3-4 мм.

Термопара 8 может соединяться с термопарой 9, располагаемой на поверхности эталона для измерения разности температур между ними с помощью чувствительного гальванометра либо для поддержания равенства этих температур с помощью регулирующего автоматического потенциометра, управляющего работой электронагревателя 5.

При экспериментальном определении ϵ_{ii} на установке (рис. 4.14) используются две методики. В первой предусмотрена компенсация перепада температур между поверхностями образца и эталона, возникающего за счет того, что у этих поверхностей в общем случае тепловая нагрузка разная. Эта компенсация производится с помощью электронагревателя 5. При нулевом перепаде справедлива простая система уравнений

$$j_{i1}r_i + q_{i1c1}; q_{i2} = q_{i2c2}; i = 1; 2. \quad (4.35)$$

Обозначим образец как $i1$, а эталон - как $i2$, где цифра 1 будет означать массообменную секцию, а 2 - "сухую" секцию каждого тепломера. Используя уравнение Ньютона $q_{i1c1} = \alpha_{i1}(t_{i1} - t_0)$; $q_{i2c2} = \alpha_{i2}(t_{i2} - t_0)$ и выводы из гл. 5 о том, что $\alpha_{i1} = \alpha_{i2}$, получаем формулу для расчета массообменного компонента тепловой нагрузки

$$j_{i1}r_i = q_{i1} - q_{i2}(1 + \theta_i), \quad (4.36)$$

где $\theta_i = (t_{i1} - t_{i2})(t_{i2} - t_0)^{-1}$ - температурная поправка.

Теплота испарения r_1 обычно для таких условий значительно отличается от r_2 , для общности расчетов можно ввести это отличие в ϵ_{ii} и трактовать эту характеристику как отношение массообмен-

ных компонентов теплового потока с поверхности продукта и эталона

$$\epsilon_{и} = \frac{q_{МПР}}{q_{МВ}} = \frac{(i^r)_{ПР}}{(i^r)_{В}} = \frac{q_{11} - q_{12}(1 + \theta_1)}{q_{21} - q_{22}(1 + \theta_2)}. \quad (4.31)$$

Система поддержания равенства температур t_{11} включает инерционное звено – электронагреватель, тепломер и слой испытуемого продукта над ним. Чтобы получать непрерывно величину $\epsilon_{и}$ в процессе обработки продукта, можно сохранять небольшое отличие между t_{11} и t_{21} , возникающее за счет неравенства $q_{11} \neq q_{21}$. Уравнения массоотдачи при этих условиях учитывают неодинаковые движущие силы

$$j_{ПР} = \epsilon_{и} \beta_{В1} (p_{11} - p_0); \quad j_{В} = \beta_{В2} (p_{21} - p_0). \quad (4.32)$$

Коэффициенты массоотдачи при испарении чистой воды с открытой поверхности $\beta_{В1}$ и $\beta_{В2}$, как показывает анализ известных зависимостей [34], очень близки друг к другу, поскольку свойства воздуха в данной зоне температур от t_{11} до t_{21} практически не меняются. Поэтому при выводе уравнения для расчета $\epsilon_{и}$ по второй методике отношение $\beta_{В1}/\beta_{В2}$ приняли равным единице

$$\epsilon_{и} = \psi \frac{q_{11} - q_{12}(1 + \theta_1)}{q_{21} - q_{22}(1 + \theta_2)}, \quad (4.33)$$

где $\psi = (p_{11} - p_0)(p_{21} - p_0)^{-1}$ – поправка на неравенство парциальных давлений водяного пара p_{11} и p_{21} при t_{11} и t_{21} .

Введение поправки ψ не требует новой измерительной информации, поскольку сигналы поверхностных термомпар t_{11} и t_{21} дают возможность определить величины p_{11} и p_{21} , а парциальное давление пара в набегающем потоке воздуха p_0 определяется с помощью отсосного психрометра, который необходим для измерения температуры и относительной влажности воздуха. Некоторое усложнение (4.39) по сравнению с (4.37) практически не увеличивает рабочего времени вычислительной машины при обработке экспериментальных данных. В память ЭВМ вводят известную зависимость $\epsilon_{и}(T)$.

Известно, что характер испарения с поверхности зависит и от структуры тел, поэтому для проверки методики выбрали типичное капиллярно-пористое тело — сухой песок фракцией 0,1...0,4 мм (как основу различных грунтов), коллоидное тело (2,5%-й агар-агар) и коллоидное капиллярно-пористое тело — говяжье мясо. В качестве эталона использовали слой сукна той же толщины, что и образец, но имеющий снизу непрерывную подпитку водой. Размеры образцов составляли: толщина — 2,8 мм, длина (вдоль воздушного потока) — 62 мм и ширина — 64 мм. Опыты проводили при комнатной температуре, т.е. сводили к минимуму "сухую" составляющую теплового потока.

Практически одинаковая чувствительность всех измерительных секций ($9,0 \cdot 10^{-3}$ мВ·м²/Вт), их тщательная градуировка по потокам тепла и массы, идентичность гидродинамической и тепловой предыстории обтекающего на образец и эталон потока воздуха, а также принятые меры по устранению боковых утечек позволяют оценить максимальную погрешность измерения q в 2%, j_B — в 4%, ϵ_n — в 7%.

На рис. 4.15 представлены результаты типичных опытов при скорости воздуха 6 м/с (1 — песок; 2 — агар-агар; 3 — мясо). В соответствии с теорией сушки для кривых 1 и 2 некоторое время зона испарения углубляется и ϵ_n держится на уровне 1,0 (некоторые опытные данные дают $\epsilon_n > 1,0$ в пределах указанной выше погрешности, однако возможно, что это результат более развитой поверхности испарения, чем у эталона). Подобные кривые в опытах по сушке аналогичных материалов получаются для скорости сушки во втором периоде, однако принимать при испарении с поверхностного слоя в качестве аргумента среднюю влажность грунта или продукта, как это принято при расчетах процессов сушки, нецелесообразно, поскольку эта величина при прогреве грунта, холодильной и тепловой обработке продуктов может оставаться почти неизменной именно в связи с тем, что убыль влаги происходит лишь в тонком поверхностном слое. Вместе с тем время само по себе не может являться определяющим фактором для испарительной способнос-

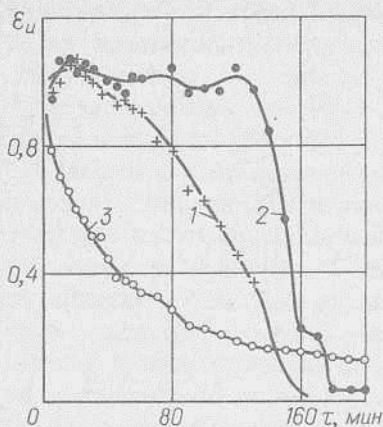


Рис. 4.15. Кинетические кривые для испарительной способности различных грунтов и продуктов

ти продукта, хотя, как видно из рис. 4.15, зависимость $\epsilon_u(\tau)$ получилась ярко выраженной.

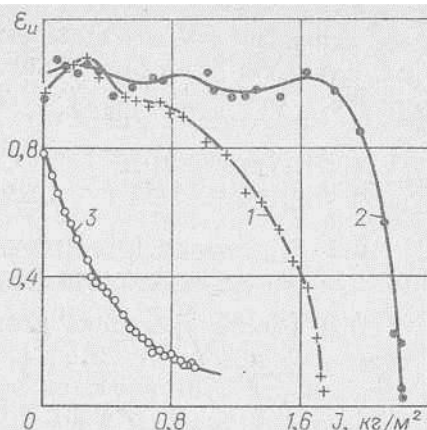
Это привело к выбору нового параметра, также связанного с состоянием поверхностного слоя продукта. В качестве аналога влажности для процессов испарения можно предложить усушку с 1 м^2 поверхности продукта, т.е. количество влаги, испаренной к данному моменту времени (текущее значение усушки). Эта величина имеет четкий физический смысл и измеряется в $\text{кг}/\text{м}^2$. Поскольку методы теплотрии позволяют измерять непрерывно в процессе обработки плотность потока массы за счет испарения j , $\text{кг}/\text{м}^2$, это дает возможность прямого определения новой характеристики путем интегрирования

$$I = \int j(\tau) d\tau . \quad (4.40)$$

В соответствии с (4.40) логично назвать I "интегральная плотность испарения". Для ее определения необходим двухсекционный тепломер (наиболее простейшая расчетная формула получается при использовании тепломера называемого тепломассомера с подогревными секциями) [64]. Вполне пригодны и другие конструкции. В частности, для одновременного определения ϵ_u и I можно использовать (4.36)

$$I = \int \left[\frac{q_1}{\gamma_{11}} - \frac{q_2}{\gamma_{12}} (1 + \theta_1) \right] \kappa_1^{-1} d\tau . \quad (4.41)$$

рис. 4.16. Использование интегральной плотности испарения в качестве аргумента на испарительной способности



По аналогии с выводом (4.39) и впредь до получения надежных данных по теплоте парообразования для каждого продукта в условиях технологического процесса можно вместо r_1 в расчетах по (4.41) использовать r_B — известную теплоту парообразования с поверхности чистой воды в тех же условиях, что и обрабатываемый объект. Получаем интегральную плотность испарения с поверхности продукта, приведенную к теплоте парообразования с поверхности чистой воды $I r_{пр}/r_B$. Поскольку для большого числа технологических процессов отношение $r_{пр}/r_B$ близко к единице, можно не вводить нового обозначения и названия для $I r_{пр}/r_B$, а в (4.41) вместо r_1 ставить r_B .

Интегрирование по (4.41) проводили с помощью ЭИМ, структура (4.41) и характер используемых измерительных средств позволяют использовать стандартные электрические или электронные интеграторы.

Результаты опытов, приведенных на рис. 4.15, перестроены в системе координат $E_n(I)$ на рис. 4.16. Четкая однозначная связь между новыми характеристиками позволяет использовать ее в расчетах процессов и аппаратов. При накоплении большого числа данных E_n и I будет возможен анализ форм связи влаги с продуктом и механизма перемещения зоны испарения. В работе [64] интегральная плотность испаре-

ния использована для выявления влияния технологических факторов на испарительную способность мяса в процессе его холодильной обработки и хранения.

5. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОМЕТРИИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

5.1. Источники погрешностей в измерении тепловых потоков и их компонентов

При выводе уравнений для расчета компонентов теплового потока (п. 2.6) рассмотрены возможные погрешности этих расчетов за счет взаимного влияния потоков теплоты и массы через разные секции сложного тепломера независимо от того, какой принцип используется для измерения плотности теплового потока. Методу "вспомогательной стенки", на котором основана теплометрия в сельском хозяйстве, присущи также некоторые другие общие источники погрешностей, обзор которых необходимо сделать перед описанием мер по метрологическому обеспечению этого метода.

Первая группа источников погрешностей относится к появлению добавочных термических сопротивлений при закладке тепломера в объект или на его поверхность. Контактное термическое сопротивление, образуемое слоем клея, полуды, шероховатостями на поверхностях объекта и тепломера, играет большую роль, особенно если между ними остается воздушная прослойка. Общее правило таково, что это сопротивление должно быть на один-два порядка меньше, чем термическое сопротивление тепломера. Если нет уверенности в этом, то приходится организовывать градуировку тепломера после закрепления на объекте.

В отдельных случаях увеличение общего термического сопротивления теплопередаче при наложении тепломера неизбежно. Если температурный напор не зависит от факта установки тепломера, то можно рассчитать поправочный коэффициент к сигналу тепломера, учитывающий этот источник погрешностей. Расчетные формулы поправочных коэффициентов для наиболее

распространенных форм теплообменных поверхностей сельскохозяйственных производств приведены в [65].

Другая группа касается нарушения одномерности линий тепловых потоков в объекте и тепломере. Тепломер необходимо накладывать одной из граней на изотермическую поверхность объекта. При малых отклонениях от этого требования можно считать поправочный коэффициент равным косинусу угла между гранью тепломера и изотермической поверхностью, с увеличением этого угла корреляция между сигналом тепломера и измеряемой плотностью теплового потока быстро убывает. К этой же группе относятся так называемые боковые утечки – искажение одномерности в самом тепломере. Здесь на основании работ [8, 14, 15] можно рекомендовать минимальное отношение диаметра тепломера к его толщине, равной десяти, при условии, что на периферии тепломера – кольца шириной не менее толщины – не будет чувствительных элементов.

Наконец, третья группа источников погрешностей определяется различием тех или иных характеристик тепломера и объекта. Вопросы учета различия в теплоемкостной способности поверхностных слоев рассмотрены в п. 2.6, общее правило здесь состоит в максимально возможном сближении этих характеристик, например, за счет наложения краски одного и того же состава.

Если теплопроводность тепломера больше, чем объекта, линии теплового потока будут "притягиваться" тепломером, сигнал его будет завышен, и наоборот. В работах [8, 14, 15] учет изменения рабочего коэффициента тепломера обоснован исследованиями модельного характера. Установлено, что если нельзя добиться равенства теплопроводности тепломера и объекта, то у первого она должна быть несколько выше, чем у второго.

К этой же группе источников погрешностей относится еще одно возможное искажение сигнала, характерное для новых решетчатых тепломеров. Технология их изготовления (п. 2.7) позволяет довести почти до нуля толщину охранного слоя δ , когда требуется

повысить λ либо снизить инерционность тепломера. При этом каждый термоэлектрод может "стягивать" линии теплового потока, общий сигнал тепломера возрастает. Количественные характеристики этой погрешности можно определить только градуировкой тепломеров, ее источник полностью устраняется при использовании температуровыравнивающих пластин или фольг.

Существенные осложнения возникают при определении погрешностей измерения массообменного компонента теплового потока и плотности потока массы, поэтому на данном этапе развития теплотрии необходимо соблюдать условия измерения этих параметров такими же, какие созданы при градуировке тепломеров.

Поскольку основное уравнение связи параметров для тепломеров, реализующих принцип вспомогательной стенки, является точным лишь для стационарного режима теплопереноса, градуировка тепломеров проводится в основном в стационарном режиме. Их можно использовать также для неустановившихся, в особенности для квазистационарных режимов [8, 14, 64]. Общее правило здесь таково: инерционность тепломера должна быть на 2-3 порядка ниже, чем инерционность исследуемого объекта.

5.2. Градуировка тепломеров

Необходимым условием теплотрии процессов и аппаратов является однозначная связь между сигналом базового тепломера и плотностью теплового потока. Технологии изготовления одиночных, галетных, спиральных, слоистых тепломеров не позволяют получать датчики с одинаковыми характеристиками. Наиболее совершенна в этом отношении технология решетчатых тепломеров (п. 2.7), но получить искомую связь чисто расчетным путем не удастся и для этого случая. Поэтому основным этапом метрологического обеспечения теплотрии является индивидуальная градуировка каждого тепломера или его секции.

Основными элементами стендов для градуировки базовых элементов по тепловому потоку являются источники стабильных контролируемых тепловых потоков и абсолютные приборы для их измерения. Обязатель-

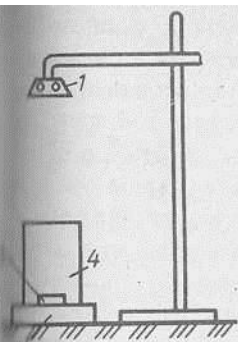


Рис. 5.1. Стенд для градуировки тепломеров по лучистому потоку

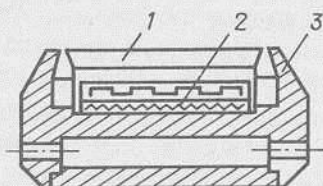


Рис. 5.2. Радиометр с энергетическим замещением

Для каждого элемента является градуировка при комнатной температуре, которая проводится при лучистом либо кондуктивном подводе энергии к элементу.

Основным является стенд с лучистым подводом энергии (рис. 5.1) от излучателя 1, набранного из двух ламп накаливания КИ-220-1000. Питание ламп производится через стабилизатор напряжения и автотрансформатор. Отвод тепла от градуируемых тепломеров и абсолютных радиометров 3 производится с помощью плоского холодильника 2, включенного в цепь ультратермостата. В ту же цепь включена и бленда 4, с помощью которой устраняется возможность местных колебаний температуры воздуха у поверхности элемента. Плотность потока энергии можно менять также за счет расстояния от излучателя до холодильника. При расстоянии 100 мм она достигает 10^4 Вт/м², равномерность падающей энергии обеспечивается применением полированного отражателя либо металлического экрана.

В качестве абсолютных приборов на этом стенде применяются радиометры с энергетическим замещением (рис. 5.2), имеющие метрологическую аттестацию.

Энергия, поглощаемая приемником 1 радиометра, проходит через базовый решетчатый или слоистый тепломер 2 к охлаждающей воде, протекающей через корпус 3; по сигналу тепломера судят об интенсивности лучистого потока. Абсолютными эти радиометры делают операция замещения: время от времени через базовый элемент пропускают энергию от встроенного (рис. 5.2) электронагревателя, проверяя чувствительность элемента и его стабильность.

При градуировке приемная поверхность радиометра или градулируемого элемента устанавливается перпендикулярно лучистому потоку (по очереди) с помощью шаблонов. Каждый замер градулируемым элементом производится между двумя замерами радиометром. Чтобы условия облучения были совсем идентичными, перед радиометром, используют в качестве абсолютного прибора эталонный тепломер с теми же габаритами, что и градулируемый элемент.

Каждый элемент (или готовое устройство) градуируется в диапазоне тепловых потоков, которые можно получить в продукте или аппарате (при пяти-шести установившихся режимах работы излучателя). Для проверки корректности исполнения тепломера (отсутствие воздушных пузырей, перекосов ленточных термоэлектродов и т.п.) градуировку производят, глядя на поверхность элемента, через которую он облучается лучистым потоком. В опытах после градуировки с одной стороны датчик, закрепленный на холодильнике с помощью замазки Рамзая, снимают, замазку удаляют, поверхность обезжиривают ацетоном и покрывают чернью того же состава, что и в обычных опытах. Градуировку повторяют, и данные обеих градуировок наносят на график $e = f(q)$, где e — сигнал датчика, мВ; q ($\text{Вт}/\text{м}^2$) — плотность потока прошедшего через датчик и вызвавшего сигнал e . Как правило, опытные точки градуировки не выходят за пределы прямой линии, обобщающей эти точки, более чем на 3%; эта цифра и считается максимальной погрешностью измерения для серийного тепломера.

Рабочий коэффициент элемента рассчитывается по формуле

$$k = \frac{k_3}{m \cdot n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{e_3}{e} \right)_{ij}, \quad (5.1)$$

где k_3, e_3 - рабочий коэффициент и ЭДС, вырабатываемый эталонным прибором в тех же условиях облучения; n - число уровней тепловой нагрузки; m - число измерений на каждом уровне.

В качестве контрольной используется градуировка кондуктивным подводом тепла к элементу (рис. 5.3). При градуировке датчик пронизывается потоком от основного (верхнего) электронагревателя, по расходу энергии на который определяется плотность потока через тепломер. Градуировка этого калориметра проводится с помощью нижнего нагревателя и чувствительного элемента (серийного бруска слоистого тепломера).

Для градуировки диффузионно-проницаемых секций тепломера по массообменному компоненту и по плотности потока массы был создан специальный стенд, в котором с большой точностью можно измерять малые расходы воды через массообменную секцию. Для этой цели использовали калиброванный капилляр, расход воды через него определяется по скорости перемещения пузырька воздуха.

Основными элементами стенда (рис. 5.4) [64] являются узлы питания водой, термостатирования тепломера и подвода к нему потока массы и кондуктивного потока энергии, а также источник стабильного энергетического потока. Узел питания содержит устройство для поддержания уровня воды одинаковым с верхней поверхностью тепломастомера, пьезометр 2 и калиброванный капилляр 3. Подвод воды к тепломеру осуществляется через дренаж 4, тепла - изменением температуры термостата 5 или излучателя 6, а также их комбинацией. Отвод тепла и паров воды производится за счет свободной или вынужденной конвекции воздуха.

Пузырек воздуха подается шприцем в нижнюю часть капилляра, а после прохождения капилляра попадает в верхнюю полость, откуда воздух выпускается в атмосферу по мере накопления.

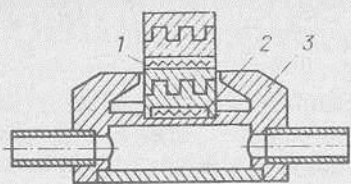


Рис. 5.3. Устройство для кондуктивной градуировки.

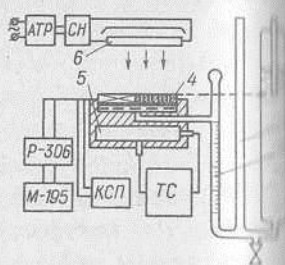


Рис. 5.4. Стенд для градуировки термомеров по потокам теплоты и массе.

Для измерения потоков тепла через секции теплообменника используются их градуировочные характеристики, полученные на стендах тепловой градуировки. Плотность потока массы j получается расчетом по расходу воды в единицу времени V_p

$$j = \frac{V_p \rho}{A \tau}, \quad (5.2)$$

где A – поверхность испарения массообменной секции датчика, соответствующая разности сигналов секций

$$A = \frac{V_p \rho r}{q_1 - q_2}. \quad (5.3)$$

По оси ординат откладываются тепловые потоки 1 и 2 (рис. 5.5) через массообменную q_1 и через сплошную q_2 секции, а также их разность 3. Рис. 5.9,а соответствует кондуктивному подводу тепла тепломерам (имитация теплообмена при испарительном и конвективном охлаждении или замораживании грунтов либо продуктов); 5.9,б – лучистому или комбинированному подводу (имитация процессов ИК-сушки, конвективной сушки, нагрева грунтов или мясных продуктов).

Статистическая обработка результатов градуировки показала: при различном тепловом воздействии на объект разность сигналов секций тепломера является линейной функцией потока массы, среднеквадратичное отклонение опытных точек от обобщающей прямой не превышает 3% (разброс точек для q_1 и q_2 на

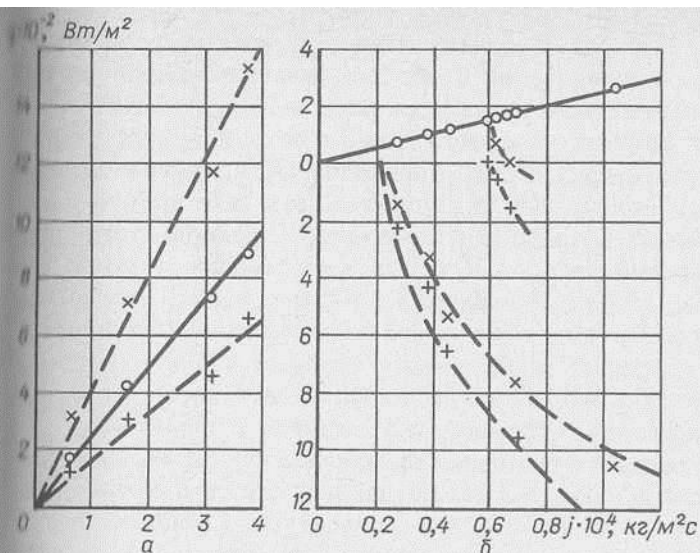


рис. 5.5. Результаты градуировки двухсекционного тепломера

рис. 5.9 не имеет значения), что и подтверждает возможность одновременного измерения плотности потока тепла и массы без снижения точности. Диапазон изменения факторов при градуировке соответствует переведенным выше технологическим процессам.

Заметим, что величина A по (5.3) для перфорированных тепломерометров получается меньше, чем площадь, занятая массообменной секцией (в полном соответствии с разделом 2.7).

5.3. Определение зависимости чувствительности базовых элементов от температуры и способы ее снижения

Градуировочные опыты на специальном стенде, позволяющем менять рабочую температуру тепломера от 10 до 100°C [8] подтвердили теоретические положения о том, что для медьконстантановых термоэлементов температурная зависимость теплопроводности компенсируется изменением термоэлектрического коэффициента, следовательно, рабочий коэффициент тепломера в этом диапазоне не зависит от температуры.

В связи с применением решетчатых тепломеров при исследовании процессов замораживания грунтов пищевых продуктов возникла необходимость в работе рабочие коэффициенты их секций при отрицательных температурах. Радиационный градуировочный стенд для этих целей не подходил, так как замена хладагента (вода с температурой, равной температуре окружающего воздуха) на низкотемпературный, например рассол, приводит к отложению на поверхности градуируемого элемента капелек воды или инея, а следовательно, к изменению степени черноты этой поверхности и появлению дополнительных термических соотвествлений. Осушение же воздуха в помещении, где проводится градуировка, или под колпаком, который можно накрыть градуировочный стенд, приводит к дополнительной громоздкой аппаратуре. Столь же неудобным оказалось применение для этих целей двойного или одинарного калориметров [8].

Наиболее простым оказалось использование метода абсолютного электрического калориметра с компрессионной изоляцией, разработанного для градуировки до температуры $+350^{\circ}\text{C}$ [8, 64]. Калориметр устроен по принципу кондуктивного подвода и отвода тепла к градуируемому датчику (рис. 5.6). Поток тепла от центрального плоского электронагревателя 4 проходит через градуируемый датчик 5, который находится в хорошем контакте с корпусом 1 нагревателя. Для предотвращения (компенсации) утечек энергии медный охранный кожух поддерживается при температуре, равной температуре корпуса центрального нагревателя. Для этого в кольцевой выточке кожуха заложен компенсационный нагреватель 2.

Этот нагреватель собран из двух обмоток. Мощность одной из них регулируется вручную при настройке опыта, чтобы она с небольшим недостатком компенсировала мощность потерь от центрального нагревателя. Фиксация этих потерь и поддержание их на нулевом уровне производится с помощью индикатора тепломера, представляющего собой обычный решетчатый элемент, который закладывается между центральным нагревателем и охранным кожухом. Вторая нагревательная обмотка питается с пропусками от сети

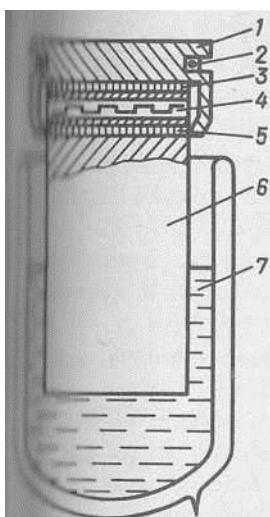


Рис. 5.6. Схема низкотемпературной градуировки

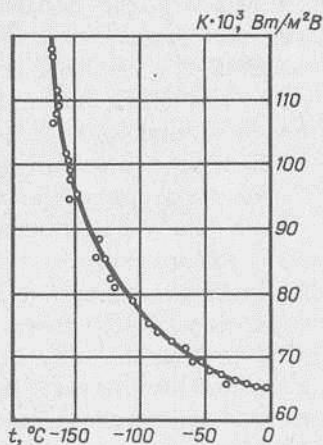


Рис. 5.7. Зависимость рабочего коэффициента тепломера от температуры

ны автоматического регулирования, поддерживающей сигнал индикатора около нуля. Регулирование производится электронным потенциометром ЭПД-12. Режим регулирования подбирается так, чтобы энергия положительных потоков через индикатор была равна энергии отрицательных потоков, а амплитудная мощность тех и других не превышала 5 % от мощности центрального нагревателя. Поскольку идентичность положительных и отрицательных потоков контролируется с точностью 10 %, неучтенная величина потерь или потоков через индикатор не превышает 0,5 % мощности, проходящей через градуируемый элемент.

При градуировке в области температур 15...90°C элемент прижимается на вакуумной смазке к поверхности обычного холодильника с проточной водой. При температурах 90...160°C используется масляный термистат. Для низкотемпературных градуировок вместо холодильника используется металлический стержень 6 (рис. 5.6) со шлифованным верхним концом. Нижним концом стержень-холодильник опускается в сосуд

Дьюара 7 с жидким азотом. По мере выкипания та термическое сопротивление стержня увеличивается так как увеличивается длина его части, не соприкасающейся с жидким азотом, и температура градуированного элемента повышается. После испарения жидкого азота градуировка продолжается в режиме монотонного прогрева элемента.

Для измерения рабочей температуры элемента, также для учета инерционности датчика и центрального нагревателя в корпус нагревателя и в стержень холодильника вблизи верхнего торца заделаны термометры (на рис. 5.6 не показаны).

На рис. 5.7 представлена зависимость рабочего коэффициента одного из элементов от рабочей температуры (рассчитывалась как среднее арифметическое из температур центрального нагревателя и верхнего торца холодильника) в области отрицательных температур. Для удобства учета зависимости рабочего коэффициента от температуры введено понятие безразмерного рабочего коэффициента \bar{k} , который представляет собой отношение рабочего коэффициента при данной температуре k к паспортной величине коэффициента при 20°C

$$\bar{k} = k \cdot k_{20}^{-1} \quad (5.4)$$

В диапазоне рабочих температур $-100 \dots 0^{\circ}\text{C}$ можно пользоваться формулой

$$k' = 1,005 + 1,7 \cdot 10^{-5} t^2 \quad (5.5)$$

Из рассмотрения полученных зависимостей следует, что, например, при исследовании охлаждения влажных грунтов или продуктов не требуется никаких поправок к паспортному коэффициенту; при умеренном замораживании объекта до температуры -20°C поправка не превышает величины 2 %, и лишь при глубоком замораживании поправочный коэффициент существенно отличается от единицы. Такие же замечания можно сделать и для условий тепловой обработки продуктов. Исследование и контроль процессов нагрева до 100°C первого периода сушки и выпечки, обжарки и варки колбасных изделий и т.п. производится без поправок

коэффициенту датчика, и только при повышении рабочей температуры до 150...180°C появляется необходимость в поправке.

Подбором заполнителей в эпоксидном компаунде (например кварцевой пудры) удается расширить диапазон температур, в котором не требуется поправок, от 100°C до +150°C.

5.5. Метрологическое обеспечение ТФХ-приборов

Базовые элементы, служащие для измерения плотности теплового потока через грани образца в ТФХ-приборах, проходят такую же градуировку, как и идущие на изготовление секций различных тепломеров (5.2). Чтобы убедиться в том, что при изготовлении измерительных блоков рабочие коэффициенты элементов не изменились, их заново градуируют с помощью эталонов теплопроводности или теплоемкости.

По результатам измерения сигналов обоих элементов e_{ij} , перепада температур на двух эталонных образцах Δt_i , их толщин h_i можно составить систему уравнений

$$\frac{\Delta t_i}{e_{ij} k_j} = \frac{h_i}{\lambda_{3i}} + R_B; \quad i=1;2; \quad j=1;2, \quad (5.6)$$

где λ_3 — известный коэффициент теплопроводности эталона. Обеспечив стационарность и одномерность теплового потока через эталон, можно записать $e_{ij} k_j = idem$ и решить систему (5.6) относительно k_j :

$$k_j = \frac{e_{2j} \Delta t_1 - e_{1j} \Delta t_2}{e_{1j} e_{2j} \left(\frac{h_1}{\lambda_{31}} - \frac{h_2}{\lambda_{32}} \right)}; \quad j=1;2. \quad (5.7)$$

Уравнение (5.7) можно упростить, применяя два эталона одинаковой толщины либо эталоны из одного материала с разной толщиной.

При использовании эталонов теплоемкости можно определить k для одного из элементов, например больший k , а второй определить из известного отношения k_1/k_2 . Исходная система уравнений при этом аналогична (4.30), ее решение дает

$$k = (c_{31} \rho_{31} h_1 - c_{32} \rho_{32} h_2) \left[\frac{m_e m_q S_1}{\delta t_1} - \frac{m_e m_q S_2}{\delta t_2} \right]^{-1}, \quad (5.8)$$

где m_e и m_q — масштабы по e и q на ленте самописца, а S — площадь ленты, замкнутая сигналами термомеров в переходном режиме цикла.

Если имеется несколько эталонов, то это позволяет получать наиболее надежные данные по k статистической обработкой.

Термопары градуируются до и после закладки измерительные блоки по реперным точкам (таяние льда и кипение воды) и в термостатах при нулевой температуре холодного спая. Применяемые МК-термопары дают высокую стабильность и воспроизводимость результатов в диапазоне температур $-100 \dots +100^\circ\text{C}$.

Необходимость защиты базовых термомеров и термопар от механического и химического воздействия образца в ТФХ-приборах приводит к появлению так называемого балластного термического сопротивления R_B (рис. 5.8), которое входит в измеряемое на приборе сопротивление $R_{изм} = \Delta t/q = h/\lambda + R_B$. Тарировка прибора по λ состоит в определении R_B .

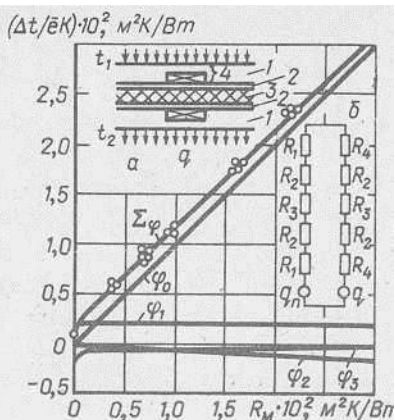
Для этого можно использовать эталонный материал, если λ_3 в рабочем диапазоне температур резко не изменяется, то можно проводить тарировку на двух образцах разной толщины. Получаем систему, аналогичную (4.27), ее решение дает

$$R_B = (R_{1изм} - R_{2изм} \frac{h_1}{h_2}) \left(1 - \frac{h_1}{h_2}\right)^{-1}. \quad (5.9)$$

Такой способ тарировки измерительного блока метрологически оправдывает себя при сопротивлении образца не менее $7 \dots 10 \text{ м}^2\text{К/кВт}$. Для большинства ТФХ-приборов R_B на порядок меньше, чем $R_{изм}$, и определяется R_B по (5.9) с погрешностью не хуже 30%, что дает ошибку в $h/\lambda = R_{ми} \lambda$ не более 3%. При меньших $R_{ми}$ начинает проявляться формальная зависимость R_B от $R_{изм}$ или $R_{ми}$, что не позволяет пользоваться (4.27), а следовательно, и (5.9)

рис. 5.8. Тепловая /а/ и электрическая /б/ мощности компонентов R и зависимости $\varphi(R)$:

- 1 - основная пластина;
- 2 - охранный элемент;
- 3 - объект; 4 - пластина с термомером



Появление зависимости $R_B = f(R_M)$ объясняется искажением линий теплового потока в тонком образце, что вызывается различными сопротивлениями между термическими поверхностями (рис. 5.8). Искривление линий может привести к несоответствию между измеряемыми Δt и q , устранить его можно поправкой ϵ , т.е. $\Delta t/q = (\Delta t/q_{изм}) + \epsilon$. Эту поправку ϵ можно определять как отношение полных термических сопротивлений - без элемента и с элементом (рис. 5.8, б) R_n/R_z , где R_n и R_z - сопротивления измерительных пластин без чувствительного элемента и с элементом. Подставляя последние уравнения в $\Delta t/q = h/\lambda + R_B$, получим

$$\frac{\Delta t}{q} = R_M + R_B - R_M \frac{2R_n - 2R_4}{2R_n + R_B - R_M} - R_B \frac{2R_n - 2R_4}{2R_n + R_B + R_M}, \quad (5.10)$$

для простоты записи $\Delta t/q = \varphi_0 + \varphi_1 - \varphi_2 - \varphi_3$. Анализ (5.10) дает возможность объяснить, почему при тарировке по (5.9) получаем зависимость R_B от R_M . В (5.10) R_B представляет собой алгебраическую сумму собственно балластного сопротивления R_B и искажений измерения φ_2 и φ_3 , которые зависят от R_M и R_B . Значит, источником систематической погрешности при изменении λ образцов с разным R_M являются φ_2 и φ_3 . Величина этой погрешности

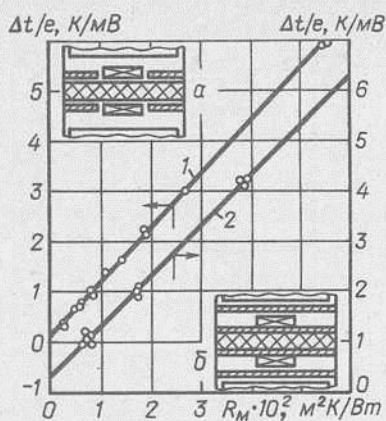


Рис. 5.9. Тепловые искажения в приборах с периферийным /а/ и сплошным /б/ теплопроводящим слоем; результаты тарирования ТФХ-приборов

$$\Delta = \frac{\varphi_2 + \varphi_3}{R_5 + R_M} \cdot 100 = \frac{2R_n - 2R_2}{2R_n + R_5 + R_M} \cdot 100 \% \quad (5.11)$$

При фиксированных значениях R_n , R_2 и R_5 для каждого ТФХ-прибора Δ будет расти с уменьшением R_M . Точный учет $(\varphi_1 - \varphi_2 - \varphi_3) = f(R_M)$ наиболее просто произвести графически в виде $\Delta t/q = f(R_M)$ (рис. 5.8) или $\Delta t/e = f(R_M)$ (рис. 5.9), пользуясь эталонными материалами с разными R_M в актуальном их диапазоне значения $\Delta t/q$ или $\Delta t/e$. На рис. 5.8 приведены расчетные по (5.10) и экспериментальные результаты для одного из приборов. Для определения R_n и R_2 этого прибора были проведены опыты по измерению λ_n и λ_2 . Экспериментальные данные по $\Sigma \varphi$ удовлетворительно совпадают с расчетными, следовательно, модель искажений верна. Использование (5.10) существенно расширяет диапазон работы прибора, в данном случае позволяет измерять R_M до $2 \text{ м}^2 \text{ К/кВт}$. Такое расширение диапазона особенно важно при значительном влиянии теплопереноса на величину λ , например при замораживании пищевых продуктов, когда λ может изменяться от 0,5 до 1,5 Вт/м·К, что вызовет резкое изменение R_M .

Анализ (5.11) позволяет определить пути повышения точности вновь создаваемых ТФХ-приборов. Очевидно, Δ будет минимальной, если сблизить между

того значения K_1 и K_2 . Увеличение знаменателя в (5.11) за счёт увеличения R_6 нецелесообразно.

Сравнить R_1 и R_2 можно по-разному. Можно увеличивать λ_1 до значения λ_2 путем введения соответствующих наполнителей в компаунд при изготовлении пластины либо размещением по периферии пластинного слоя теплопроводного материала такой толщины, чтобы эффективное R_1 стало равным R_2 . Оба варианта дали положительные результаты. Результаты тарировки блока с медной пластиной по периферии (рис. 5.9) обработаны в виде линейной зависимости (рис. 5.9,1)

$$\Delta t/e = 0,1229 + 0,1066 R_H \pm 0,0022 \text{ К/мВ.} \quad (5.12)$$

При измерительного блока, в котором подобран материал пластины для выравнивания R_1 и R_4 , а кроме того, использована медная фольга как защитный слой блока, тарировка блока также получилась линейной (рис. 5.9,2)

$$\Delta t/e = 0,3409 + 0,1004 R_H \pm 0,0026 \text{ К/мВ.} \quad (5.13)$$

При такой обработке коэффициент при R_H есть отношение среднего k базовых элементов и поправки \mathcal{E} . В обоих случаях эти коэффициенты оказались весьма близкими к рабочим коэффициентам элементов k , следовательно, поправка \mathcal{E} практически равна единице.

Тарировку измерительного блока по теплоемкости можно производить с помощью эталона. Балластная теплоемкость блока $(c\rho)$, в которую входит теплоемкость защитного слоя и частично (примерно половина) теплоемкость самих базовых элементов, определяется как разность между полной измеренной теплоемкостью $c\rho$ и теплоемкостью эталона $(c\rho)_3$

$$(c\rho)_6 = c\rho - (c\rho)_3. \quad (5.14)$$

При отсутствии подходящего эталона можно использовать для тарировки даже исследуемый продукт, толь-

ко проводить ее на образцах разной толщины. Тот же аналогично решению задачи о зернистых материалах (4.30) можно решить систему относительно (ϵ/λ) . При этом всегда можно подобрать такие толщины образцов, чтобы погрешности измерений были минимальными.

5.5. Минимизация погрешности в определении ТФХ сельскохозяйственных объектов и продуктов

Метод определения λ в стационарном режиме, кроме тепломеров, включает использование одиночных термопар для измерения температуры или перепада температур. Обычно используют медьконстантановые термопары (МК), они показали высокую стабильность и воспроизводимость в диапазоне 170...375 К. Градуировка их производится до закладки в тепломер, а в готовом устройстве по реперным точкам (таяние льда и кипение воды) и в термостатах.

При измерении ТФХ и тепловых эффектов погрешности в определении q и \dot{t} относятся к инструментальным. К этой же группе систематических погрешностей относятся погрешности вторичных измерительных приборов, а также устройств для измерения толщины образца и обеспечения параллельности его поверхностей.

Среди методических погрешностей определения λ в плоском слое при стационарном режиме выделим возможные в ТФХ-приборах неоднородность температурного поля в образце, зависимость $\lambda(t)$, влияние лучистого и конвективного переноса тепла и влияние утечек тепла по токосъемным проводникам. Первая причина тщательно изучена (см. 5.1), к числу дополнительных мер по ее устранению относится изоляция боковых поверхностей образца либо поддержание тепловых потерь через них на заданном уровне, а также обеспечение надежного теплового контакта образца с поверхностями тепловых блоков за все время проведения опытов.

Вторая причина может учитываться при расчете температуры отнесения с помощью формулы (4.9). В практических измерениях зависимостью $\lambda(t)$ можно

можно пренебречь, так как чувствительность базовых тепломеров и термопар позволяет проводить опыты при $\Delta t = 1...3$ К.

Лучистый теплообмен в жидких или пастообразных продуктах практически отсутствует, для предотвращения конвективных токов в образце каждый измерительный блок для каждого образца проверяется с помощью известного правила Крауссольда. Для зернистых материалов, а также при исследовании продуктов в процессах обработки доля лучистого и конвективного переноса тепла может учитываться в эффективных ТФХ продукта, соответствующих данному технологическому процессу.

Влияние утечек тепла по термоэлектродам базовых элементов и термопар сведено к нулю за счет их расположения по изотермическим поверхностям на длине $\approx 100d$ и применения проводников диаметром $1...0,2$ мм.

Таким образом, в соответствии с принятой методикой учета погрешности измерений достоверное значение λ можно определить из теоретической модели с поправками на систематические ψ_i и случайные погрешности

$$\lambda = qh(\Delta t)^{-1} \pm \sum \psi_i \pm \xi. \quad (5.15)$$

Как показано выше, большинство возможных систематических ошибок учтено и сведено к минимуму при создании приборов и методик. Вместе с неучтенными систематическими погрешностями их относим к эффективному балластному термическому сопротивлению R_B . Снизить случайные погрешности, систематические погрешности личного характера, а также неизбежные флуктуации свойств продуктов и материалов, большинство из которых являются лабильными, неоднородными или анизотропными, можно лишь повторными измерениями различных образцов и статистической обработкой результатов измерения. Подставляя в (5.15) все измеряемые величины, получим

$$\lambda = h \left[\frac{2E_{\Delta t}}{(k_1 e_{q1} + k_2 e_{q2}) k_{\bar{t}}} - R_B \right]^{-1} \pm S_{\lambda}. \quad (5.16)$$

Статистическая обработка опытных данных показала, что оценка среднеквадратичной погрешности S_c но не превышает 3%.

Аналогичные выводы сделаны в отношении точности, определяемой по методу циклов, кроме того проделана работа по оптимизации формы площади измеряемой линиями $q_1(t)$ и $q_2(t)$ [64]. В результате для расчета теплоемкости, после подстановки теоретическую модель (4.6) измеряемых величин получена формула

$$c = \left(\frac{f_q k \cdot M_q M_{\dot{t}} k_t}{\rho h (e_{tk} - e_{tn})} - c_B \right) \pm S_c \quad (5.1)$$

Остальные ТФХ получаем расчетным путем.

Приведенный выше анализ погрешностей измерений ТФХ полностью пригоден и при измерениях \dot{t} в квазистационарном режиме, некоторые источники здесь исключаются или уменьшаются, например, за счет снижения динамических погрешностей первичных и вторичных преобразователей. Минимизацию погрешностей за счет подбора оптимальных режимных параметров здесь можно провести расчетным путем, поскольку в расчетные формулы метода входит $(q_1 - q_2)$, необходимо избежать случая, чтобы это была малость двух больших величин. Погрешность в определении q_1 и q_2 не превышает в ТФХ-приборах $\pm 1\%$, полагая допустимым для $(q_1 - q_2)$ эту величину увеличить втрое, получим $3(q_1 - q_2) \geq (q_1 - q_2)/0,1$ или первое условие оптимальности тепловой нагрузки

$$\frac{q_1 - q_2}{q_1 + q_2} \geq 0,17. \quad (5.1)$$

Второе условие получим, считая возможным применение для расчета температуры отнесения ТФХ среднеарифметического значения. Для этого сравним ее с точной формулой отнесения, которая получается из (2.8)

$$\bar{t} = \frac{t_1 + t_2}{2} - \frac{\Delta t (q_1 - q_2)}{6(q_1 + q_2)}. \quad (5.1)$$

Приняв, что вторым членом в (5.19) можно пренебречь, если множитель при Δt не превышает 0,01

пример, при использовании в опытах $\Delta t = 2\text{K}$ (при отбрасывании второго члена составит $\approx 1\text{K}$ и ею можно пренебречь), получим второе условие оптимальности тепловой нагрузки

$$\frac{q_1 - q_2}{q_1 + q_2} \leq 0,30. \quad (5.20)$$

Понимая, что при нагревании $q_1/q_2 > 1$, при охлаждении $q_1/q_2 < 1$ получим для обоих случаев оптимальные интервалы q_1/q_2 из (5.18) и (5.19)

$$\begin{aligned} 1,40 < (q_1/q_2)_{\text{нагр.}} < 1,85; \\ 0,54 < (q_1/q_2)_{\text{охл.}} < 0,71. \end{aligned} \quad (5.21)$$

Расчетные формулы для определения ТФХ данным методом строятся аналогично (5.16) и (5.17), т.е. с учетом эффективных балластных сопротивлений и инерсий.

5.6. Метрологическое обеспечение приемников теплового излучения

В управляемых технологических процессах, связанных со взаимодействием теплового излучения с объектом, плотность потока теплового излучения в контрольной зоне объекта – один из информационных параметров. В системах измерения и управления процессами теплообмена основным звеном является приемник теплового излучения.

Надежность информации о тепловой картине, получаемой с помощью приемников теплового излучения, определяется соответствием технической характеристики прибора условиям его эксплуатации, а также метрологической достоверностью определения характеристики. Метрологическое обеспечение измерений – задача сама по себе более сложная, чем разработка рабочего средства измерения. До последнего времени широко применяемые в практике приемники теплового излучения не имели метрологической аттестации. Совместными усилиями Института технической теплофизики АН Украины и НПО "Метрология" Госстандарта страны разработан комплекс средств метрологической аттестации и поверки приемников теплового излучения в диапазоне от $0,1$ до 10^6 Вт, м^{-2} [42, 97].

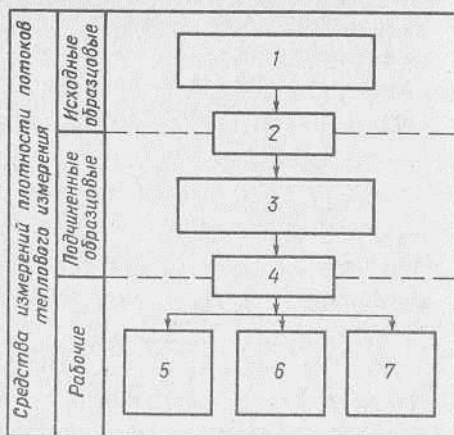


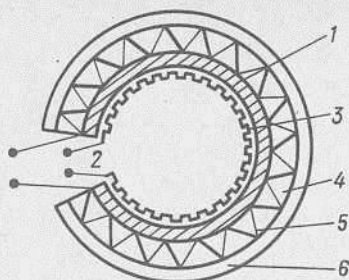
Рис. 5.10. Локальная поверочная схема метрологической аттестации приемников теплового излучения:

1 - исходные образцовые приемники $\lambda = 0,3 \div 30$ мкм; $q = 0,1 \div 30$ кВт·м⁻²; $\Delta = 2\%$; $q = 0,3 \div 2 \cdot 10^3$ кВт·м⁻²; $\Delta = 3\%$; 2 - сличение при помощи компаратора; 3 - подчиненные образцовые приемники $\lambda = 0,3 - 30$ мкм; $q = 0,1 \div 30$ кВт·м⁻²; $\Delta = 3,5\%$; $q = 0,3 \div 2 \cdot 10^3$ кВт·м⁻²; $\Delta = 3,5\%$; 4 - сличение при помощи компаратора; 5 - рабочие приемники $\lambda = 0,3 - 30$ мкм; $q = 0,1 \div 3,3$ кВт·м⁻²; $\Delta = 7\%$; 6 - рабочие приемники $\lambda = 0,3 \div 30$ мкм; $q = 0,3 \div 30$ кВт·м⁻²; $\Delta = 6\%$; 7 - рабочие приемники $\lambda = 0,3 \div 30$ мкм; $q = 0,3 \div 2 \cdot 10^3$ кВт·м⁻²; $\Delta = 7\%$

В основу системы метрологического обеспечения положена локальная поверочная схема во главе с исходным образцовым приемником излучения. Единица плотности потока излучения согласно локальной поверочной схеме передается от исходного образцового приемника к подчиненному образцовому приемнику излучения и затем от последнего к рабочим приемникам методом сличения при помощи компаратора (рис. 5.10).

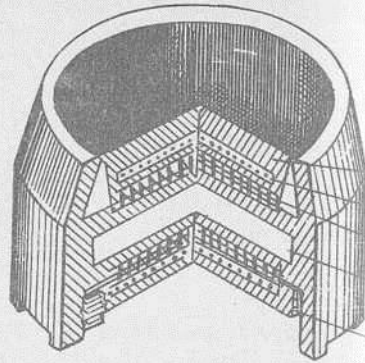
Аппаратурно локальная поверочная схема реализована последовательно во времени в виде двух установ

5.11. Исходный образцовый приемник теплового излучения типа: 1 - сферическая полость; 2 - входное отверстие; 3 - встроенный электрический нагреватель; 4 - корпус термоэлектрических элементов; 5 - корпус термобатарей; 6 - трубка водоохлаждаемая

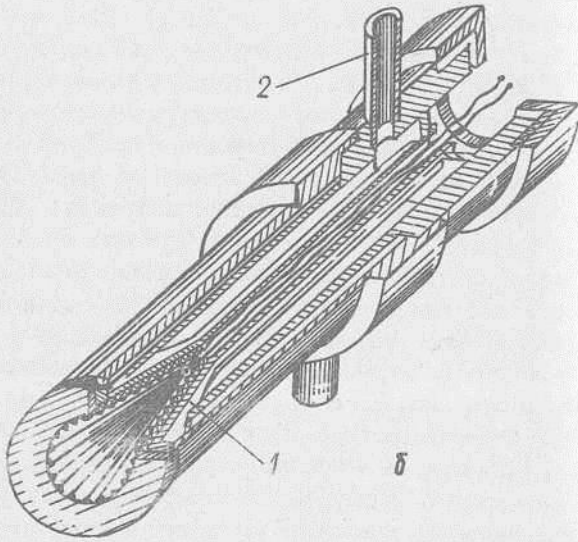


с градацией по диапазону измерений: $q = 0,1 + 0,1 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$ и $q = 0,3 + 2000 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$. В качестве исходного образцового средства первой установки служил шаровой полостной приемник компенсационного типа, разработанный НПО "Метрология" на основе приемника [4] (рис. 5.10, 5.11). Его основные элементы: сферическая полость 1 диаметром 10 мм с входным отверстием 2, встроенный электрический нагреватель 3 и термоэлектрический чувствительный элемент 4. Принцип действия прибора основан на сравнении теплового воздействия на чувствительный элемент измеряемого потока излучения с тепловым воздействием электрической мощности методом интегрирования плотности теплового потока через оболочку полости по поверхности приемника. Интегрирование осуществляется термобатареей, состоящей из 150 гальванических термопар. Рабочие спаи расположены в плоскости большого круга, проходящего через входное отверстие полости с переменным шагом. Холодные спаи закреплены на полой трубке, через которую прокачивается термостатированная жидкость. Специальное размещение термопар уменьшает наиболее неопределенную погрешность приемников компенсационного типа, обусловленную неидентичностью температурных полей оболочки полости при облучении и замещении мощностью электрообогрева.

Неисключенная систематическая погрешность прибора оценена в 2% экспериментальным изучением и поэлементным анализом погрешностей. Подчиненным образцовым приемником служит плоский приемник с энергетическим замещением типа РАП, изображенный



a



б

Рис. 5.12. Подчиненные образцовые приемники теплового излучения:

а - типа РАП:

1 - приемное тело, 2 - основной термопреобразователь; 3 - корпус; 4 - электрический нагреватель; приемное тело компенсационного термопреобразователя

б - типа ИКАР-10:

1 - чувствительный элемент, 2 - система охлаждения

рис. 5.12,а. Приемное тело 1, изготовленное из материала с высокой теплопроводностью (меди), смонтировано на водоохлаждаемом корпусе 3 так, что поступающая энергия проходит через преобразователь 2. Термическое сопротивление преобразователя на два порядка выше, чем у приемного тела, поэтому практически безразлично, каким образом к приемной поверхности подведена энергия — обстоятельство, позволяющее поглощенную энергию излучения взаимно замещать энергией электрического нагревателя 4. Корпус 3 также изготовлен из меди. Его внешняя поверхность лакирована для уменьшения поглощения фонового потока энергии. Охлаждение корпуса осуществляется термостатированной водой.

Прибор имеет устройство для компенсации погрешности, обусловленной флуктуацией параметров внешней среды и кладагента. Он снабжен рабочим и компенсационным чувствительными блоками, термобатарей которых включены по дифференциальной схеме. Необходимо в этом случае равенство чувствительности и инерционности элементов обеспечено независимым регулированием этих характеристик. Инерционность компенсационного приемника изменяется с помощью регулируемого теплового шунта 7, выполненного в виде набора винтов, ввинчиваемых в резьбовые отверстия между корпусом 3 и телом компенсационного блока. Ввинчивание приводит к уменьшению термического сопротивления и связанной с ним тепловой инерционности. Чувствительность при этом также снижается. Сравнение приемников по чувствительности производится с помощью переменного шунтирующего сопротивления в цепи более чувствительного блока.

Компаратор представляет собой вакуумную камеру с азотными экранами и источником излучения, поток которого поочередно направляется на образцовый и градуируемый приемники. Плотность мощности измеряется исходным образцовым приемником и затем ставится в соответствие выходному сигналу градуируемого приемника. С помощью этой установки теплоприемники градуировались с основной погрешностью $\pm 7\%$ в зависимости от поддиапазона измерений.

Применение рабочих средств измерения потоков теплового излучения в технологических процессах должно быть обеспечено наличием нормированных метрологических характеристик в нормальных и рабочих условиях с учетом всех возможных источников погрешностей, возникающих из-за отличия условий эксплуатации и градуировки. Такими источниками могут быть: зависимость выходного сигнала приемника от оптической обстановки (угла падения луча на приемную поверхность, фонового излучения), температурной стабильности, чувствительности измерительного преобразователя, теплообмена преобразователя с окружающей средой, теплопритоков через детали крепления, колебания давления среды и т.д.

Для проведения исследований по определению статистических и динамических характеристик, основных и дополнительных погрешностей, функций влияния, параметров надежности приемников теплового излучения (т.е. метрологической аттестации их как рабочих средств) создан единый автоматизированный комплекс включающий в себя набор технических, методических и аппаратно-программных средств. Комплекс позволяет оперативно получать и обрабатывать результаты основных теплофизических исследований, а также осуществлять планирование эксперимента. Комплекс реализует ту же поверочную схему, но с расширением диапазона плотностей потоков излучения до $2 \cdot 10^6$ Вт/м². Комплекс состоит из двух основных частей (рис. 5.13) — тепловакуумной камеры (ТВК) с набором агрегатных средств, позволяющих создавать различные условия эксплуатации для испытываемых приборов, информационно-управляющей системы (ИУС) для автоматического поддержания или изменения условий эксплуатации и воздействий, а также получения и обработки информации. На рис. 5.13: БУП, БУРП, БУРТ — соответственно блоки управления перемещением, режимами приемников и температурными режимами; ДП, ДД, ДТ, ДА — датчики положения, давления, температуры, аварийные; МП — механизм перемещения; Н — нагреватели; П — преобразователи; И1 — ИЧ — излучатели; СО — система откачки; УБП — управляемые блоки

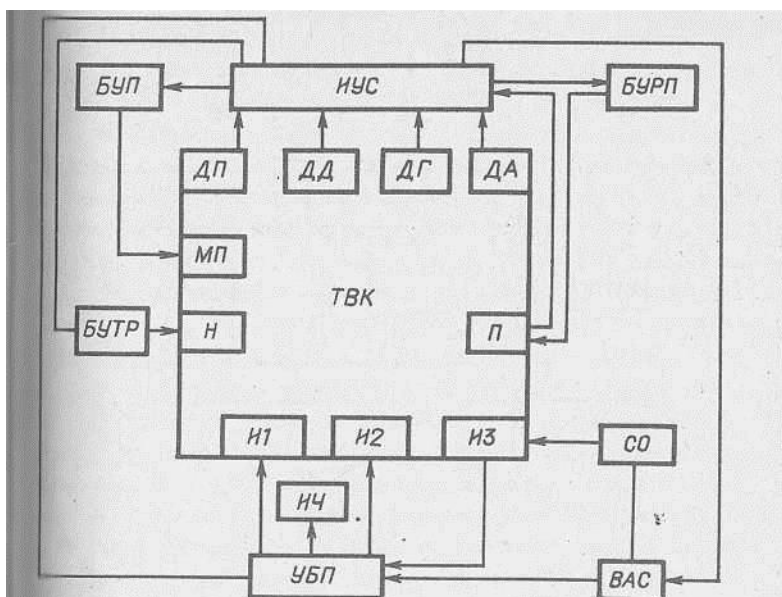


Рис. 5.13. Тепловая часть стенда для метрологической аттестации приемников теплового излучения

ния; ВАС – блок аварийной сигнализации и защиты. В тепловакуумной камере объемом 1 м³ расположен стол, на котором могут устанавливаться до восьми исследуемых приемников теплового излучения. Механизм пространственного перемещения стола позволяет воспроизводить восемь фиксированных положений в одной плоскости и совмещать координату центра приемной поверхности испытываемого приемника с оптической осью контрольной плоскости излучателя с погрешностью не более 0,05 мм. Испытываемые приемники могут подвергаться воздействию регулируемого потока излучения плотностью от 0,3 до $2 \cdot 10^6$ Вт/м². Такая широкая область диапазона перекрывается применением четырех источников излучения: двух моделей АЧТ, галогенной лампы с оптической системой внутри камеры и источника когерентного излучения по ее. Режимы работы излучателей поддерживаются управляемыми блоками питания. Все излучатели расположены на осях фиксированных положений механиз-

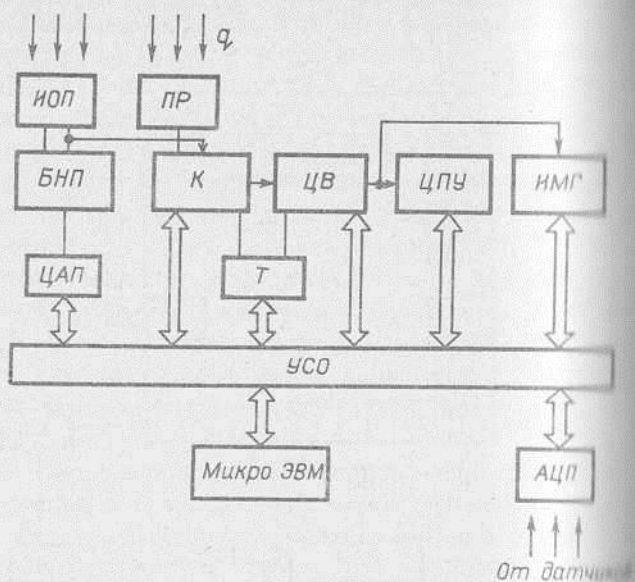


Рис. 5.14. Информационно-управляющая часть системы для метрологической аттестации приемников теплового излучения

ма перемещения в одной плоскости. Юстировка расположения оптических осей излучателей и приемников производится по источнику когерентного излучения. Система откачки, включающая форвакуумный и основной масляный насосы, позволяет получить разрежение в камере до 10^{-4} Па. Для создания тепловой и температурной обстановок в камере без ее разгерметизации, а также для управления режимами работы приемника предусмотрены механический, оптический, пневматический, гидравлические и электрические гермовводы.

Управление ходом эксперимента, сбор и обработка информации и представление ее в единицах измеряемых величин осуществляется информационно-управляющей системой на основе микроЭВМ (рис. 5.14, где БНП – блок нормирования температурного потенциала; К – коммутатор; ЦВ – цифровой вольтметр; ЦПУ – цифровпечатное устройство; ИМГ – индикатор микричный газоразрядный; ЦАП, АЦП – цифроаналоговые

аналого-цифровой преобразователи; Т – таймер; О – устройство связи с объектом). Такое построение системы позволяет вести эксперимент по оптимальному плану, использовать аппаратные и программные методы фильтрации и коррекции погрешностей, применять принципы инвариантности как для приемников, так и для методов измерения потоков теплового излучения при дистанционном удалении приемников, подвергающихся жестким переменным условиям эксплуатации, а также позволит оператору вмешиваться в ход эксперимента в режиме диалога. Отображение текущей информации о параметрах, отражающих условия эксплуатации, и значениях величин воздействующих факторов эргономически увязано с упрощенной схемой пространственного расположения исследуемых приемников. Любая информация отображается по вызову оператора на экране дисплея, выводится на печатающее устройство, а также может регистрироваться на перфоленте или магнитной ленте встроенного кассетного накопителя микроЭВМ. Длительные испытания по определению измерений основных метрологических характеристик приемников во времени позволили экспериментально определять параметры надежности и выдавать рекомендации на установление оптимальных межповерочных интервалов. Все экспериментальные работы по испытаниям и исследованиям приемников проводятся по отработанным методикам и программам, в которых отражены современные требования статистического подхода к исследованию и определению метрологических характеристик.

В качестве исходного образцового приемника комплекса использован шаровой приемник модификации РИТ-4СУ, который представляет собой изготовленную из никеля гальваническим способом тонкостенную полую сферу диаметром 40 мм с входным отверстием 6 мм. Чувствительным элементом является вольфрам-нихромовая термопара, положение которой на сфере выбирается из условия наименьшей методической погрешности, обусловленной неидентичностью температурных полей приемной полости в режимах облучения и замещения [44].

Подчиненным образцовым приемником служит приемник ИКАР-10, разработанный ИТТФ АН УССР, который представляет собой полостной конический термопреобразователь с замещением измеряемой мощности электрической. Диаметр входного отверстия - 10 мм, угол при вершине конуса - 10° . Чувствительным элементом является термоэлектрическая батарея, расположенная по всей поверхности конуса [48], рис. 5.12,6.

Допустимые пределы погрешности, установленные локальной поверочной схемой для передачи единицы измерения плотности потоков теплового излучения от исходного образцового средства через подчиненное образцовое средство к рабочему распределено следующим образом: исходное образцовое средство - 2 %, подчиненное образцовое - 4 %, рабочее средство измерений - 8 %.

Высокая стабильность интегральной плотности потока излучения в контрольной плоскости внутрикамерных излучателей, юстировка координат механизма перемещения, возможность автоматического поддержания неизменных условий, применение высокоточных измерительных приборов в ИУС, наличие оптимальных методов проведения эксперимента позволили обеспечить воспроизводимость показаний $0,5 \pm 1\%$ во всем диапазоне потоков.

Таким образом, метрологически обеспечен последовательный ряд приборов для измерения потоков теплового излучения в диапазоне $100 \pm 2 \cdot 10^6$ Вт/м².

Приемник типа РАП служит также для градуировки рабочих измерительных преобразователей теплового потока [10]. Методически это осуществляется следующим образом. При помощи встроенного электрического нагревателя производится градуировка образцового приемника, по которому в дальнейшем эталонируется подающий поток излучателя. Затем образцовый и градуировочный преобразователи располагаются в контрольной плоскости излучателя. Главное условие корректной градуировки состоит в том, чтобы эталонированный поток излучения полностью прошел через градулируемый преобразователь. Для этого приемная по-

поверхность его покрывается такой же краской, какой окрашена приемная площадка образцового приемника. Преобразователь плотно притирается на смазке к поверхности охлаждаемого термостатированной водой корпуса холодильника, по конструкции подобного корпуса радиометра. Уравнения теплового баланса облучаемых одинаковым потоком образцового и градуированного приборов в стационарном состоянии можно представить в виде

$$q + q_{\varphi} = \frac{T_{п.р} - T_{н.р}}{R_{т.р}} + \alpha(T_{п.р} - T_0) + \epsilon_p \sigma T_{п.р}^4 + (1 - \epsilon_p)(q + q_{\varphi}),$$

для градулируемого преобразователя

$$q + q_{\varphi} = \frac{T_{п.п} - T_{н.п}}{R_{т.п}} + \alpha(T_{п.п} - T_0) + \epsilon_n \sigma T_{п.п}^4 + (1 - \epsilon_n)(q + q_{\varphi}),$$

где все обозначения с индексом "р" относятся к образцовому, с индексом "п" - к градулируемому приборам. Выражение $q + q_{\varphi}$ - это плотность падающего потока излучения, причем q - от излучателя, q_{φ} - от фона; $\frac{T_{п.р} - T_{н.р}}{R_{т.р}} = k_p \epsilon_p$, $\frac{T_{п.п} - T_{н.п}}{R_{т.п}} = k_n \epsilon_n$ - плотности потоков, воспринимаемые приборами и вызывавшие в них электрические сигналы ϵ_p и ϵ_n ; $T_{п.р}$, $T_{п.п}$ - температуры облучаемых поверхностей соответственно; $T_{н.р}$ - температура термостатирования корпуса; $R_{т.р}$, $R_{т.п}$ - термические сопротивления преобразователей; $\alpha(T_{п.р} - T_0)$, $\alpha(T_{п.п} - T_0)$ - конвективные теплотери с поверхностей в окружающую среду с температурой T_0 ; $\epsilon_p \sigma T_{п.р}^4$, $\epsilon_n \sigma T_{п.п}^4$ - потоки собственного излучения поверхностей; $(1 - \epsilon)(q + q_{\varphi})$ - потоки отраженного излучения. Вследствие равенства коэффициентов поглощения поверхностей эти потоки для образцового и градулируемого приборов равны.

Так как к приборам подводится одинаковая энергия, то правые части уравнений равны. Если ввести обозначение $T_{п.п} - T_0 = \Delta T_n$ и $T_{п.р} - T_0 = \Delta T_p$ и воспользоваться разложением в ряд $T_{п.п}^4$ и $T_{п.р}^4$ по степеням T_0 и ΔT , то получим следующее равенство:

$$\begin{aligned} k_p e_p + 2 \Delta T_p + 4 \epsilon \sigma T_0^3 \Delta T_p \gamma_p(z) = \\ k_n e_n + 2 \Delta T_n + 4 \epsilon \sigma T_0^3 \Delta T_n \gamma_n(z), \end{aligned}$$

где $\gamma(z) = \gamma\left(\frac{\Delta T}{T_0}\right) = 1 + 1,5z + z^2 + 0,25z^3$.

Из анализа этого равенства следует, что если термостатирование поверхностей образцового и градуированного преобразователей поддерживать в температурном равновесии с окружающей средой, то тепловые потери на свободную конвекцию и обратное переизлучение будут исключены. В этом случае определенный коэффициент преобразователя k_n , представляющий собой коэффициент пропорциональности между воспринятым потоком и генерируемым им сигналом, равен

$$k_n = \frac{k_p e_p}{e_n}, \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{мВ}^{-1};$$

где k_p — рабочий коэффициент радиометра.

Кроме первичной метрологической аттестации, проводимой на стационарных комплексах, в приборах, предназначенных для длительных дистанционных измерений, предусмотрена возможность перманентного метрологического сопровождения [48, 83]. Особенностью таких приборов является то, что они генерируют сигнал, пропорциональный измеряемому потоку, независимо от изменения температурных и оптических параметров и собственной температуры благодаря применению двух теплотеметрических систем в одном блоке: измерительной и градуировочной. Последняя по сути генерирует опорный сигнал, который служит мерой сравнения для сигнала приоритетной системы. Каждый из преобразователей снабжен электрическим нагревателем, расположенным на облучаемой стороне. Измеряемый поток излучения q падает одновременно

оба чувствительных элемента. К одному из них, например второму, постоянно подводится дополнительный нормированный тепловой поток ρ путем электроподогрева. Сигнал этого преобразователя равен

$$e_2 = (q + \rho) \cdot \theta \left(\sum_{i=1}^n \psi_i \right),$$

где θ – коэффициент пропорциональности между подводимой к поверхности элемента энергией и генерируемым сигналом, ψ_i – некоторая влияющая на сигнал величина, внутренняя или внешняя.

Сигнал e_2 по линии связи поступает на прямой вход дифференциального усилителя (ДУ), расположенного вне зоны действия лучистого потока и влияющих факторов. На инверсный вход ДУ по линии связи поступает электрический сигнал первого преобразователя e_1 , равный

$$e_1 = q \cdot \theta \left(\sum_{i=1}^n \psi_i \right).$$

Электрический сигнал e_3 на выходе усилителя является результатом производимой им операции вычитания входных сигналов e_2 и e_1

$$e_3 = e_2 - e_1 = k_{ДУ} \cdot \theta \left(\sum_{i=1}^n \psi_i \right) \cdot \rho.$$

Таким образом, при нормированном дополнительном тепловом потоке ρ и нормированном масштабе коэффициенте усиления $k_{ДУ}$ электрический сигнал e_3 несет информацию о коэффициенте первичного преобразователя и его изменении под воздействием суммы влияющих факторов $\sum_{i=1}^n \psi_i$. Электрические сигналы e_1 и e_3 с выхода дифференциального усилителя поступают на соответствующие входы измерителя отношений двух напряжений. Его выходной сигнал является результатом отношений входных сигналов

$$e_{и} = k_{и0} \frac{e_1}{e_3},$$

где $k_{и0}$ – коэффициент преобразования измерителя отношений. Подставляя значения e_1 и e_3 , получим

$$e_{и} = q \frac{k_{и0}}{k_{ДУ}} \frac{1}{\rho}.$$

В результате на выходе устройства получен сигнал, пропорциональный измеряемому потоку и независимый от воздействия переменных (влияющих на коэффициент первичного преобразователя) факторов.

Для первичного и периодического контроля терморadiационных характеристик материалов разработан метод двух радиометров. Он основан на измерении поглощаемого или излучаемого образцом потока излучения одновременно с измерением падающего потока. Исследуемое покрытие наносится на приемную поверхность прибора типа РАП. В вакууме при облучении прибора потоком в стационарном состоянии уравнение теплообмена можно записать в виде

$$a_x(T_2)q = \epsilon_x(T_1)\sigma T_1^4 + [(\lambda/\delta)_{эф}(T_1, T_2)](T_1 - T_2),$$

где T_1, T_2 - соответственно температуры облучаемой и термостабилизированной поверхностей чувствительного элемента приемника; q - падающий поток излучения; $(\lambda/\delta)_{эф}(T_1, T_2)$ - эффективная теплопроводность преобразователя; $\epsilon_x(T_1)\sigma T_1^4$ - поток, излучаемый исследуемым покрытием; $[(\lambda/\delta)_{эф}(T_1, T_2)](T_1 - T_2)$ - поток, проходящий через чувствительный элемент. При отсутствии потока излучения (т.е. $q = 0$) уравнение теплообмена принимает вид

$$\epsilon_x(T_1)\sigma T_1^4 + (\lambda/\delta)_{эф}(T_1 - T_2) = 0.$$

В этом случае генерируемый преобразователем сигнал характеризует непосредственно поток собственного излучения поверхности. Параметр $(\lambda/\delta)_{эф}$ активно нормируется при конструировании преобразователя и связан с сигналом преобразователя e_x через коэффициент преобразования $k_x(T_1, T_2)$:

$$k_x(T_1, T_2)e_x = (\lambda/\delta)_{эф}(T_1 - T_2).$$

Температуры T_1 и T_2 коррелируют между собой однозначно через эффективную теплопроводность, поэтому привязка решения может проводиться только к одной

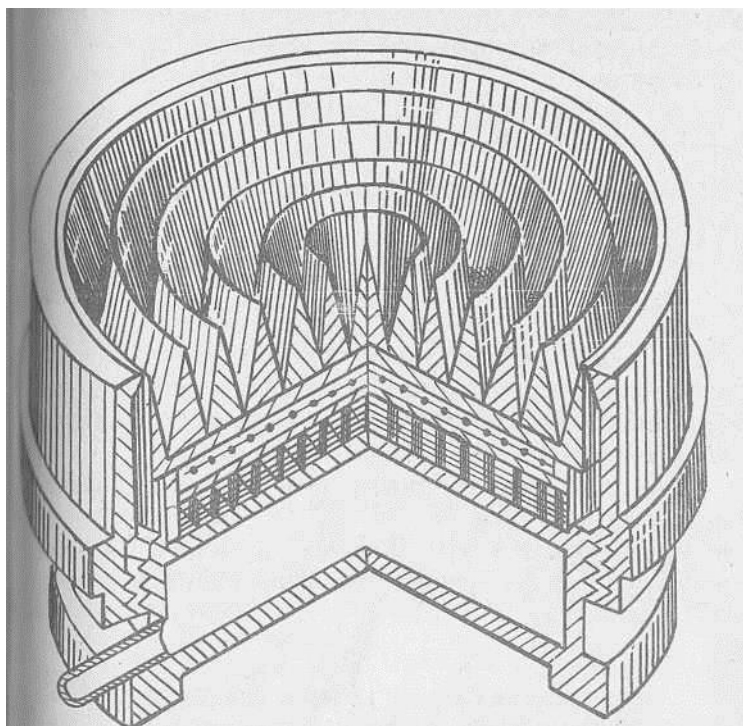


рис. 5.15. Приемник теплового излучения с приемной поверхностью в виде модели абсолютного черного тела

температур. Практически это удобно выполнять по
При этом

$$\epsilon_x(T_2) \sigma T_1^4 = k_x(T_2) e_{x_0}(T_2),$$

$e_{x_0}(T_2)$ - сигнал преобразователя при $\varphi = 0$.
как $e_{x_0}(T_2)$ и $k_x(T_2)$ инвариантны ко
м другим параметрам системы "источник - среда -
омник", кроме температуры приемника, то их зна-
ния определяются предварительно во всем рабочем
диапазоне T_2 и могут быть представлены в виде функ-
ционалов зависимостей $e_{x_0} = \varphi_1(T_2)$; $e_x = \varphi_2(T_2)$.
коэффициент σT_1^4 может быть представлена как $\sigma T_1^4 =$
 $\varphi_3(T_2)$. Таким образом, излучательная способ-

ность покрытия определяется в режиме $q = 0$ из отношения

$$\epsilon_x(T_2) = \frac{\varphi_1(T_2) \cdot \varphi_2(T_2)}{\varphi_3(T_2)}.$$

Поглощательная способность при этом определяется в режиме облучения как

$$a_x(T_2) = \frac{\epsilon_x(T_2)\varphi_3(T_2) + \varphi_2(T_2)\epsilon_x}{q}.$$

Поток падающего излучения q измеряется непосредственно вторым приемником компенсационного типа приемной поверхностью в виде модели абсолютно черного тела (рис. 5.15).

Метод позволяет производить не только измерения исходных значений a_x и ϵ_x , но также их деградацию под воздействием влияющих факторов. Оценки погрешностей измерений составляют 5,8 % для a_x , 4,7 % для ϵ_x .

6. ТЕПЛОМЕТРИЯ ОБРАБОТКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРОДУКТОВ

6.1. Охлаждение зерна в псевдооживленном слое после уборки урожая

В технологии послеуборочной обработки зерна важным является его охлаждение до температур, обеспечивающих резкое снижение физиолого-биохимических процессов и сохранение качества зерна. Совместно ВНИИЗерна исследовали эффективность вертикальных теплоотводящих поверхностей при охлаждении риса (зерна) в псевдооживленном слое на модели роторного охладителя [64].

Псевдооживление нешелушенного риса производится в кольцевом зазоре шириной 50 мм между стенками высотой 230 мм, охлаждаемыми рассолом. Тепломер с ХК-термопарами были заделаны заподлицо в стену и от истирания зерном и мешалкой защищены тонким защитным слоем эпоксидного компаунда с кварцевой пудрой в качестве наполнителя. Поскольку при этом неизбежно искажение сигнала тепломера за счет

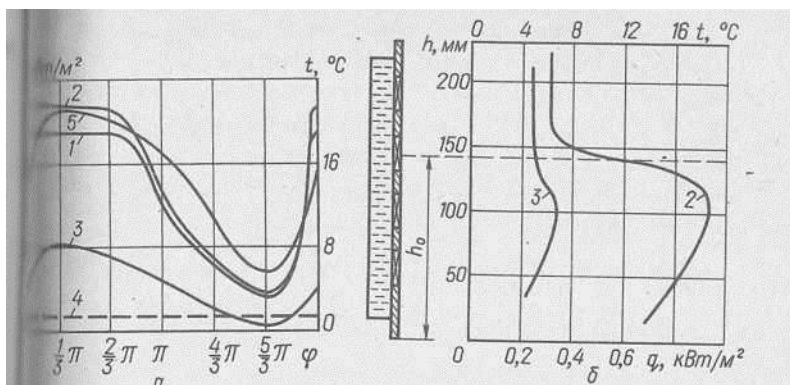


рис. 6.1. Эпюры q и t по периметру /а/ и высоте рабочего канала охладителя зерна

стенок λ стенки из нержавеющей стали и самого полимера, градуировку элементов производили дважды – на градуировочном стенде и после монтажа на стенке, а при обработке данных учитывали снижение за счет увеличения R .

На рис. 6.1 приведены типичные эпюры q (1, 2) $t_{ст}$ (3) по периметру (а) и по высоте (б) стенки, а также температуры воздуха на входе 4 и выходе 5 из аппарата. Сравнение измеренных 1 действительных эпюр q показывает, что искажение за счет базового элемента не превышает 14%. На рис. 6.1,б видны две зоны теплообмена, граница между ними проходит примерно по высоте псевдооживленного слоя h_0 .

Для определения эффективности охлаждающих поверхностей были выбраны два критерия – средняя плотность теплового потока \bar{q} , которую получали двойным интегрированием – по h и φ , и доля тепла, отводимого стенками непосредственно от зерна и воздуха Q_c/Q , где $Q_c = qA$, а Q определили как разность энтальпий зерна на входе и на выходе из охладителя.

Данные всех 24 экспериментов были обработаны на ЭВМ "Мир-2" в виде уравнений регрессии в зависимости от начальной температуры зерна $t_{3н}$ (17,7... 15-1500к

31,5°C), начальной влажности зерна W_H (16,1...25,9%), скорости фильтрации оживающего воздуха ω_Φ (1,03...2,17 м/с) и его начальной температуры $t_{\Phi H}$ (0,3...11°C), времени пребывания зерна в аппарате τ (29...93 с), температуры стенки t_c (2,6...7,3°C) и высоты h_0 (0,098...0,133 м). Получены уравнения

$$q = 18,4 t_{\Phi H} + 1,18 W_H - 14,1 \omega_\Phi - 3,20 \tau + 29,1 t_{\Phi H} - 15,2 t_c - 6078 h_0 - 395 \pm 0,7 \quad (6.1)$$

$$\alpha_c/\alpha = 1,46 t_{\Phi H} - 0,53 t_{\Phi H} - 0,28 W_H + 1,12 \omega_\Phi + 0,048 \tau - 1,57 t_c + 127 h_0 + 15,2 \pm 2,68\% \quad (6.2)$$

Множественные коэффициенты корреляции [64] для (6.1) и (6.2) равны соответственно 0,856 и 0,948. Все коэффициенты (6.1) и (6.2) значимы, их влияние на q и α_c/α соответствует физическим представлениям о теплообмене в псевдооживленном слое.

Для определения коэффициента теплоотдачи к стенке необходимо было определять температуру зерно-воздушной смеси. Для этого на одну из лопастей мешалки была закреплена ХК-термопара так, что ее незащищенный спай соприкасался с зерном и воздухом [64]. Предварительные опыты показали, что наиболее близки к q показания базового элемента, расположенного на высоте 50 мм от газораспределительной решетки, поэтому эта термопара была закреплена на той же высоте. Поскольку мешалка вращалась со скоростью 0,5 оборота в минуту, специальных токосъемников не применяли, длина токосъемных проводов позволяла работать непрерывно в течение 40 мин.

Измерения начинали после выхода установки на стационарный режим, что контролировали по показаниям базового тепломера; продолжительность опыта составляла 10...15 мин. Зависимость $\alpha \equiv q/\Delta t$ от ω_Φ вначале является общей для слоев с разной начальной высотой (рис. 6.2), что соответствует плотному пер-

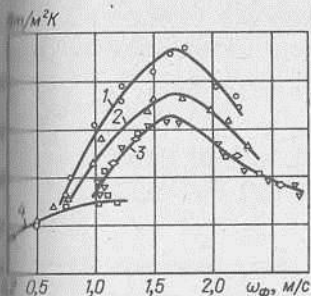


Рис. 6.2. Коэффициент теплоотдачи от слоя зерна к стенке как функция скорости фильтрации

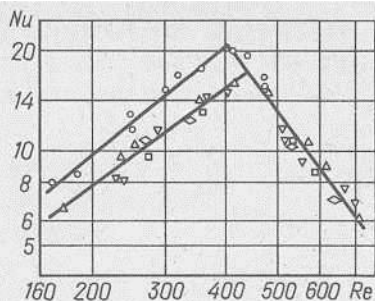


Рис. 6.3. Обобщение данных по теплоотдаче от псевдооживленного слоя риса к стенке

ощаемому мешалкой слою. При скорости фильтрации 0,7...0,9 м/с слой переходит в псевдооживленное состояние, и α резко возрастает (начальная высота слоя: 1 - 50...60 мм; 2 - 70...80; 3 - 100...175 мм). Максимальное значение α получено при $\omega_{\phi} = 1,6...1,7$ м/с.

Результаты опытов обработаны в форме уравнений подобия, в качестве определяющего размера принят приведенный диаметр зерна (рис. 6.3). Восходящая ветвь 1 зависимости $Nu(Re)$ для слоев зерна с начальной высотой 50...60 мм описывается уравнением

$$Nu = 0,046 Re^{1,12}, \quad 160 < Re < 400, \quad (6.3),$$

для слоев с начальной высотой 70...175 мм [27-

$$Nu = 0,048 Re^{0,96}, \quad 160 < Re < 430. \quad (6.4)$$

Нисходящая ветвь 3 для любой начальной высоты слоя описывается одинаково

$$Nu = 5,28 \cdot 10^6 Re^{-2,09}. \quad (6.5)$$

Сопоставление расчетов по (6.3)...(6.5) и многочисленным уравнениям подобия и полуэмпирическим зависимостям, имеющимся в литературе по псевдооживленному слою, дает основания рекомендовать (6.3)...(6.5), несмотря на некоторую условность

обобщения, для других конструкций охладителей, на пример аэрожелобов, и для более широкого класса охлаждаемых продуктов и материалов.

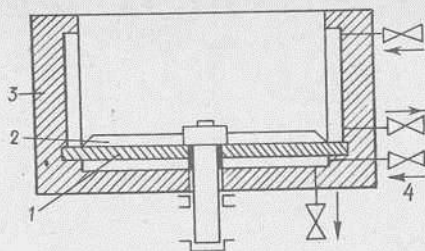
6.2. Теплоотдача к механически перемешиваемому слою зернистого материала

Галетные тепломеры были использованы Р.Ф. Сковским при исследовании кинетики теплоподвода к подсолнечной мятке в процессе ее жарения [65]. В уменьшенной модели чанной жаровни (рис. 6.4) тепло производился в основном через плоское днище 1 от конденсирующегося при давлении 0,2–0,3 МПа пара 4. Кольцевая рубашка служила для компенсации потерь в окружающую среду, для этого в ней поддерживался неглубокий вакуум. Снаружи вся установка была покрыта изоляцией 3. Перемешивание слоя мятки осуществлялось мешалкой 2 с лопастями-ножами. В днище жаровни на одном радиусе были выфрезерованы три лунки по размеру тепломеров, их закрепление производилось с помощью термостойкого клея и потайных винтов, которые вворачивались в днище так, что прижимали обечайки тепломеров. Спаи ХК-торфопар располагались в днище, а также в слое продукта. Через год после проведения опытов один из тепломеров прошел повторную градуировку на стенде, его действительность практически не изменилась.

Предварительные опыты показали, что при различных режимах жарения и применении различных мешалок плотность теплового потока остается равномерной по поверхности днища, незначительно (до 3,5 %) увеличиваясь к периферии. Поэтому в основных опытах показания тепломеров усреднялись.

На рис. 6.5 показаны результаты типичного опыта по изучению кинетики теплообмена при жарении сушеной мятки. Чтобы исключить влияние влагообмена, мятку для этих опытов высушивали на сублимационной установке до влажности 0,35% и хранили в герметично закупоренных емкостях.

6.4. Установка
исследования теп-
лоотдачи к механически
перемешиваемому
слою



Из рис. 6.5 видно, что плотность теплового потока к слою меняется по кривой, близкой к экспоненте. Средняя температура слоя t_M растет, а $\Delta t = t_A - t_M$ убывает также по экспоненте. Коэффициент теплоотдачи $\alpha \equiv q/\Delta t$ практически не меняется во времени, поэтому для обобщения опытных данных эта величина является удобной.

Выбор типа мешалки, дающей наилучшее перемешивание, производили по величине α . Исследованы три типа мешалок: двухлопастные (рис. 6.6) с одинаковой высотой 1 по радиусу $h = 20$ мм и с понижающейся высотой 2 (от 20 до 5 мм), а также четырехлопастные 3 с одинаковой $h = 20$ мм. Угол наклона лопастей к горизонту φ меняли от 30° до 60° . Наибольшую интенсивность перемешивания дает мешалка типа 1 с углом наклона 60° (рис. 6.6). Поэтому дальнейшие опыты проводились только с этим типом мешалки.

Их результаты были обобщены методами теории подобия. В качестве определяющего размера было выбрано отношение h^2/H , где h - высота мешалки, а H - высота слоя обрабатываемого продукта. С увеличением H уменьшается эффективность перемешивания, с уменьшением - поверхность нагрева может оголяться, что также равносильно снижению α . Основным фактором, определяющим интенсивность теплообмена, принято время τ контакта частиц с поверхностью нагрева, которое зависит от числа оборотов, отношения H/d и времени неустойчивого перемешивания $\tau_{уст}$ - эта функция определяется экспериментально для каждого вида продукта [65]. Безразмерное время контакта представляется в виде числа Пурье

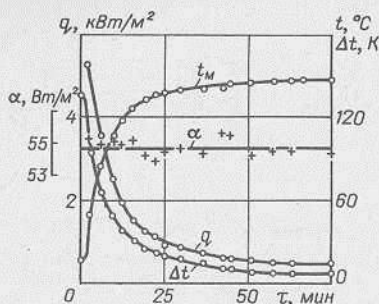


Рис. 6.5. Кинетика теплоподвода к слою мятки

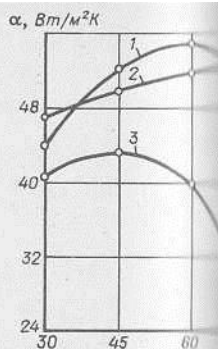


Рис. 6.6. Влияние угла наклона лотка мешалки на α

$$F_0 = \frac{\alpha \lambda H^2}{h^4} \quad (6.6)$$

Влияние температурного поля в слое продукта отражено в уравнении подобия симплексом $(t_c - t_0)/t_0$, где t_c — температура стенки и контактирующего с ней продукта, а t_0 — начальная температура мятки.

$$Nu = 0,315 F_0^{-0,5} \left(\frac{t_c - t_0}{t_0} \right)^{0,67} \quad (6.7)$$

Числа F_0 менялись в этих опытах от $2 \cdot 10^{-2}$ до 30, температурный симплекс — в узких пределах от 5,4 до 7,0. Возможно, расширение диапазона приведет к необходимости замены симплекса на $(T_c - T_0)/T_0$. Характеристики материала α и λ , которые подставляются в числа F_0 и $Nu = \alpha h^2 / (\lambda H)$, необходимо брать при средней температуре слоя.

Наличие влаги в сыпучем продукте приводит к увеличению поверхности соприкосновения с греющей стенкой, добавочному теплоотводу за счет испарения, уменьшению температуры продукта. Все эти факторы приводят к увеличению интенсивности теплоотвода в сравнении с сухим продуктом.

При исследовании влияния влажности на α в дополнение к измерениям q и t каждые 3...5 мин отбиралась проба материала на влажность [65]. На

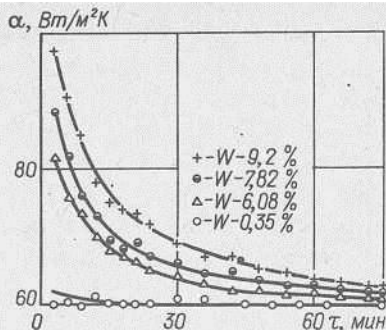
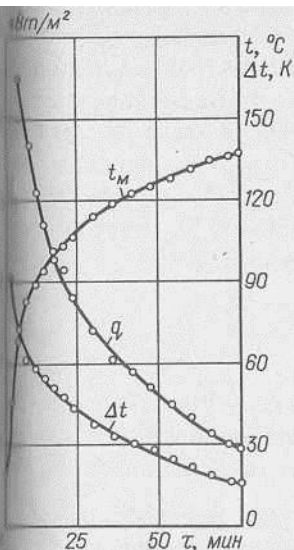


Рис. 6.7. Кинетика теплоподвода при жарении мятки

Рис. 6.8. Влияние влажности мятки на коэффициент теплоотдачи

Влажность w_H меняли от 6,0 до 9,2 %. За время жарения w падала по экспоненте, что соответствует периоду падающей скорости сушки.

Характер изменения q и Δt во времени такой же, как при нагреве сухого материала, но кривые не так круты (рис. 6.7), что связано с более медленным нарастанием температуры материала t_M . Коэффициент теплоотдачи в каждом опыте постепенно уменьшается и приближается к значению α для сухого продукта. Для различных w_H это изменение показано на рис. 6.8. При $w_H = 9,2$ % коэффициент теплоотдачи почти в 2 раза выше, чем для сухого материала, т. е. наличие только абсорбционно связанной влаги (о чем свидетельствует отсутствие первого периода сушки с постоянной скоростью) приводит к значительной интенсификации теплообмена механически перемешиваемого слоя.

Обобщение опытных данных по влиянию массообмена на теплообмен произведено путем введения в сравнение подобия (6.7) симплекса $w_H / (w_H - w)$, где w — средняя по высоте слоя влажность материала. Выбор этого симплекса удобен для перехода к сухому материалу. Если он обращается в единицу и $B^x - 1500k$

неудобен для описания начальной фазы процесса, так как $w_H \approx w$ и симплекс обращается в бесконечность. Для условий $w_H/(w_H - w) \leq 20$, т.е., начиная с $w = 0,95\%$, при изменении числа оборотов мешалки от 13,5 до 55 об/мин, температуры стенки t_c от 128 до 160°C, H/h от 2,5 до 8, w_H от 0,35 до 9,2% с погрешностью не более 6%, коэффициент теплоотдачи можно найти из уравнения

$$Nu = 0,345 Fo^{-0,5} \left(\frac{t_c - t_0}{t_c} \right)^{0,67} \left(\frac{w_H}{w_H - w} \right)^{0,7} \quad (1)$$

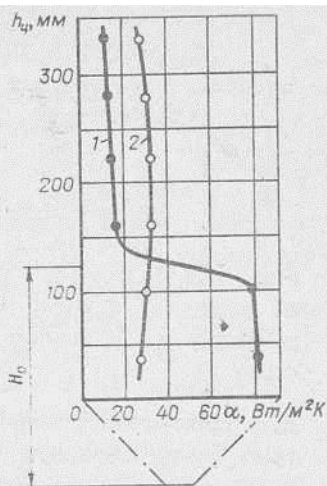
Для других сыпучих материалов использование этого уравнения возможно после определения среднего времени контакта с греющей поверхностью.

6.3. Теплообмен при продувке, фонтанировании и пневмотранспортировании зерновых продуктов

Теплоотдача от твердой поверхности к продуваемому (фильтруемому) неподвижному слою зерна и слою, фонтанирующему под действием воздуха, исследовалась Ю.Г. Клименко с помощью слоистых тепломеров на цилиндро-коническом аппарате [65]. Режим фильтрации или фонтанирования определялся расходом воздуха через аппарат. Во втором случае в конической части аппарата (рис. 6.9) образуется канал, в котором частицы движутся со скоростями, близкими к скоростям пневмотранспорта. По мере снижения скорости струи газа в результате ее растекания по сечению аппарата частицы продукта тормозятся, отбрасываются к стенкам и опускаются, замыкая циркуляцию.

Как и в случае псевдооживления (п. 6.1), здесь актуален теплообмен со стенками аппарата, поскольку зерновые продукты, в особенности семенного фонда, не могут обрабатываться газом с высокой температурой. В качестве продуктов разных размеров использованы горох диаметром 5...7 мм, пшено - 2 мм и семена рапса - 1-2 мм. Тепломеры и в этих опытах градуировались дважды: на градуировочном стенде и после монтажа в стенке аппарата.

рис. 6.9. Изменение α по высоте цилиндрико-конического аппарата



При изучении влияния скорости газа, продувающего неподвижный слой зерна, получено уравнение подобия

$$Nu = Nu_0 + 0,0167 Re Pr^{0,33}, \quad (6.9)$$

где в качестве определяющего размера принят средний гидравлический диаметр порового канала, скорости для расчета $Re = wt/\nu$ — средняя расходная скорость газа, число $Pr = \nu/a$ и λ взяты по средней температуре газа.

Уравнение (6.9) составлено для Re от 10^2 до $2 \cdot 10^3$, но интерполяция его к $Re = 0$ не лишена физического смысла, как это имеет место в одночленных уравнениях подобия.

При исследовании распределения α к фонтанирующему слою по высоте цилиндрической части аппарата (рис. 6.9) выявлены две особенности. Во-первых, аппарат делится по высоте (примерно равной начальной высоте неподвижного слоя H_0) на два участка (кривая 1). Высокие значения α на нижнем участке обеспечивает подвижность слоя частиц. Во-вторых, на верхнем участке α ниже, чем для потока воздуха без продукта (кривая 2). Видимо, при одинаковом расходе воздуха скорость его у стенки выше без продукта. Отсюда следует практический вывод: при проектировании аппаратов для обработки термочувствитель-

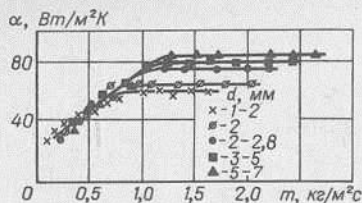


Рис. 6.10. Влияние расхода воздуха на α к фильтруемому и фонтанирующему слою

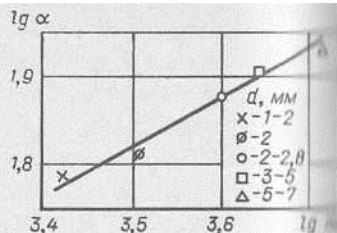


Рис. 6.11. Зависимость от минимальной скорости фонтанирования частиц

ных продуктов обогреваемой нужно делать лишь нижнюю часть аппарата.

Переход от фильтрации к фонтанированию происходит для частиц разного размера при различных массовых скоростях воздуха m , кг/м²с (рис. 6.10). С переходом к развитому фонтанированию интенсивность теплообмена перестает зависеть от расхода воздуха. По-видимому, возрастание α за счет увеличения скорости падающих у стенки и соприкасающихся с ней частиц компенсируется снижением его за счет падения скорости воздуха у стенки. Отсюда следует, что в аппаратах с обогреваемой стенкой повышать расход теплоносителя выше минимальной скорости фонтанирования m_0 нецелесообразно.

Чем больше размер частиц, тем больше m_0 и α . На рис. 6.11 показано, что между средним значением α для данного продукта и минимальной скоростью фонтанирования имеется логарифмическая зависимость. Эта связь указывает на общность процессов в фонтанирующем и кипящем слоях. Поэтому, как и в случае кипящего слоя, в качестве определяющего гидродинамику критерия подобия здесь выбрано число Архимеда

$$Ar = \frac{g \delta^3}{\nu^2} \frac{\rho_M - \rho}{\rho_C}, \quad (6.10)$$

где δ — средний размер частицы, ρ_M и ρ — плотность материала и газа. Поскольку зерновые сельскохозяйственные продукты мало отличаются по плотностями

и ρ_m , для обобщения дополнительно были проведены опыты со стальными шариками. Получено уравнение подобия для расчета

$$Nu = 0,026 Ar^{0,42} Pr^{0,33} \left(\frac{D}{d_0}\right)^{0,16}, \quad (6.11)$$

где введено отношение диаметров цилиндрической части аппарата D и входного отверстия d_0 как характеристика геометрического подобия. Это уравнение пригодно для определения локальных коэффициентов теплоотдачи в нижней части цилиндрической стенки к фонтанирующему слою при $D/d_0 = 3 \dots 7$; $Ar = 1,36 \cdot 10^5 \dots 1,1 \cdot 10^7$ и угле раскрытия конической части $45 \dots 90^\circ$. Размер зерен также играет роль, так как для частиц малого размера (меньше одного миллиметра) логарифмическая зависимость (см. рис. 6.10 и 6.11) нарушается, так как для них основную роль играет подвод тепла при контакте частиц со стенкой и с возрастанием m растет и α .

Для конической части аппарата опыты проводились как с подводом теплоты к зерну (нагрев, сушка), так и с отводом теплоты (охлаждение зерна), что достигалось изменением температуры воды, омывающей часть конуса с заделанными по его образующей термомерами. В обоих случаях температура воды отличалась от температуры зерна и воздуха на $15 \dots 50$ К, что соответствует условиям обработки термолабильных продуктов.

При исследовании фильтрующего слоя зависимость α от m так же, как и для цилиндрической стенки, получается линейной, однако наклон линии зависит от угла раскрытия конуса β . Приняв, что это влияние вызвано различным наклоном вектора расчетной скорости (по оси конуса) к образующей конуса, Ю.Г. Клименко обобщил данные для цилиндрической и конической стенок одним уравнением

$$Nu = Nu_0 + 0,0167 (\cos \beta)^{1,2} Re Pr^{0,33}. \quad (6.12)$$

Переход к фонтанированию в отличие от цилиндрической стенки может сопровождаться пиком коэффициента теплоотдачи (рис. 6.12). По мере удаления от

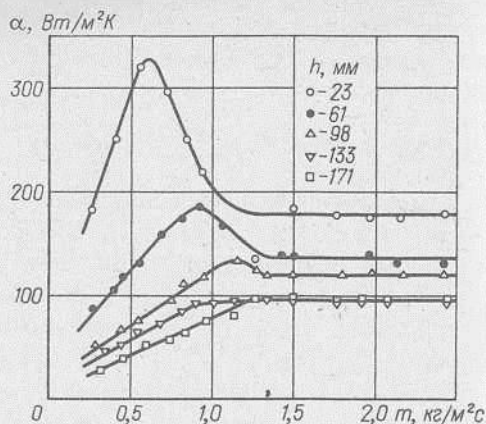


Рис. 6.12. Зависимость α по высоте конической стенки с углом раскрытия 45° от расхода воздуха для зерна диаметром 5...7 мм.

входного отверстия пик сглаживается. Следовательно, он вызван увеличением местной скорости фильтрации воздуха у входа при переходе к фонтанированию. При развитом фонтанировании, как и для цилиндрической стенки, интенсивность теплоотдачи перестает зависеть от массовой скорости воздуха.

Уровень α зависит от расстояния до входного отверстия, с удалением от него α падает, постепенно приближаясь к значениям α на цилиндрической стенке. Среднее значение α для конической части получается на 25...30 % выше, чем для цилиндрической, и с учетом этой поправки может определяться из уравнения (6.11).

Подвод тепла через стенки аппарата к зерну зачастую оказывается недостаточным, тогда прибегают к различного рода погруженным в слой теплообменникам. Испытывались две модели теплообменников с заделанными в них тепломерами и термопарами – сферическая диаметром 25 мм и цилиндрическая диаметром 30 мм.

С помощью сферического электрообогреваемого зонда исследовали локальный теплообмен к неподвижному и падающему (гравитационному) слою зерна. На

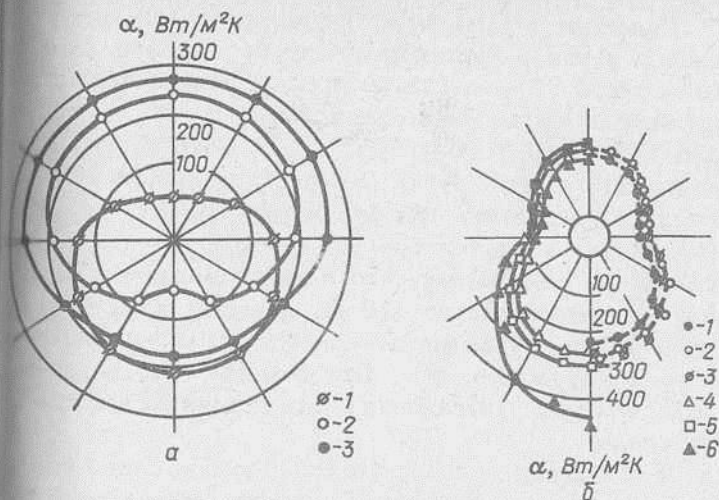


рис. 6.13. Распределение α по поверхности сферического нагревателя:

к слою (а): 1 - фильтруемый слой; 2 - гравитационный слой; 3 - гравитационный противоточный слой;

к газовзвеси (б): 1 - $Re = 0$; 2 - $Re = 0,49$; 3 - $Re = 1,32$ ($Re = 15 \cdot 10^3$); 4 - $Re = 0,35$; 5 - $Re = 0,82$; 6 - $Re = 3,5$ ($Re = 2,1 \cdot 10^4$)

рис. 6.13 представлены типичные эпюры α к неподвижному слою, продуваемому воздухом снизу со скоростью 0,18 м/с, а также к гравитационному слою, падающему со скоростью 0,52 см/с без продувки и продувкой воздухом снизу со скоростью 0,13 м/с. При фильтрации через неподвижный слой максимальные значения α имеют место на лобовой (нижней) части зонда, а к кормовой части α монотонно уменьшается. При увеличении скорости продувки эпюры α растягиваются книзу, в кормовой части интенсивность теплообмена остается прежней.

При обтекании зонда падающим слоем без продувки лобовая и кормовая части менялись местами, а в гравитационном противоточном слое распределение α по поверхности теплообменника, естественно, стало более равномерным.

Подобные опыты были проведены также для газовой взвеси зерна в вертикальной трубе высотой 10 м и диаметром 72 мм. Опыты проводились в диапазоне изменения числа Рейнольдса $Re = w_p d_z \nu_r^{-1}$ от $1,5 \cdot 10^4$ до $2,6 \cdot 10^4$ (d_z - диаметр зонда) и концентрации зерна μ 0,28...4,90 кг/кг (рис. 6.13,б). На том же рисунке для сравнения нанесем эпор α при обдуве зонда чистым воздухом ($\mu = 0$). Это сравнение показывает, что наличие зерна в воздухе при концентрациях до 1,5 кг продукта на 1 кг воздуха оказывает незначительное влияние и на величину, и на форму эпора α . При больших μ происходит относительное увеличение теплоотдачи на лобовой части зонда.

Теплообмен зонда с фонтанирующим слоем зерна исследовался в цилиндрико-коническом аппарате (рис. 6.13,а). Данные опытов с одинаковым массовым расходом воздуха $m = 1,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$ и диаметром частиц $d = 2,0 \dots 2,8 \text{ мм}$ приведены на рис. 6.14. Зонд устанавливался на различных расстояниях r от оси аппарата и на двух высотах: в пределах первоначальной высоты слоя H (данные на правой части эпора) и за пределами этой высоты (левая часть эпора). Интенсивность теплообмена максимальна на оси аппарата. В нижней части слоя α плавно падает от лобовой части к кормовой, в верхней же части эпор α напоминает эпор для газовой взвеси (см. рис. 6.13,б) с минимумом около 130° , считая от лобовой части. С приближением к стенкам аппарата эпоры становятся аналогичными с распределением α в противоточном гравитационном слое.

По усредненным значениям α по поверхности зонда построена картина распределения коэффициента теплоотдачи по объему фонтанирующего слоя в цилиндрической части аппарата (рис. 6.15). Как и для теплообмена зерна со стенками аппарата, здесь видно, что α от погруженных поверхностей нагрева в нижней части аппарата значительно выше. В каждой из горизонтальных плоскостей заметно уменьшение α от центральной части (ядра) фонтанирующего слоя к

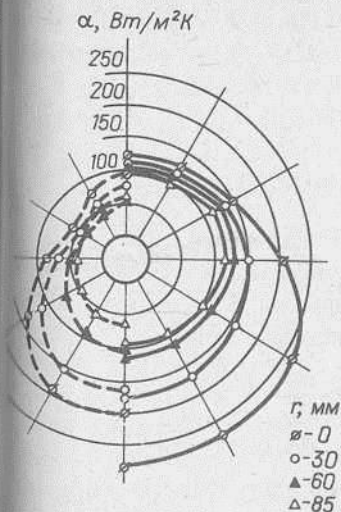


Рис. 6.14. Эшор α по поверхности нагревателя в зависимости от расстояния r мм до оси цилиндрической части аппарата: 1 (0; 2) 30 мм; 3 (60 мм; 4) 85 мм

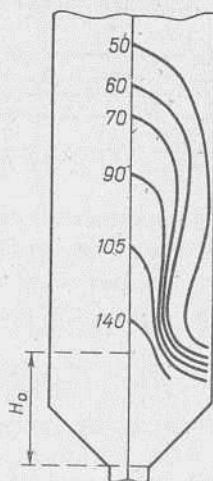


Рис. 6.15. Распределение среднего α в Вт/м²К от нагревателя к фонтанирующему слою

периферии, и лишь в самой верхней части аппарата α выравнивается по радиусу.

Наиболее распространенным элементом погруженных поверхностей нагрева является горизонтальная труба, поэтому для фонтанирующего слоя опыты были проведены также с трубчатым зондом. Распределение α по периметру горизонтальной трубы оказалось качественно и количественно одинаковым с распределением по поверхности сферического зонда в любой части аппарата. При исследовании влияния массового расхода воздуха на теплообмен установлено, что при достижении m_{ϕ} в фильтруемом слое распределение α , следовательно, и скорость воздуха равномерны в каждом сечении аппарата. Зависимость среднего по поверхности трубы значения α (если труба установлена в диаметральной плоскости аппарата) аналогична зависимости для наружных стенок аппарата. Переход к развитому режиму фонтанирования сопр

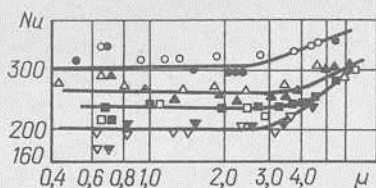


Рис. 6.16. Зависимость $Nu(\mu)$ при пневмотранспорте зерна

ся увеличением α с возрастанием m . Поэтому при обобщении опытных данных введено отношение m/m_φ . Для аппаратов с углом раскрытия конической части $2\beta = 45...90^\circ$ рекомендовано уравнение

$$Nu = 0,005 Ar^{0,41} \left(\frac{m}{m_\varphi}\right)^{0,5} \quad (6.13)$$

в зоне цилиндрической части до высоты H_0 и

$$Nu = 0,1 Ar^{0,37} \left(\frac{m}{m_\varphi}\right)^{0,2} \quad (6.14)$$

при установке погруженной трубы выше H_λ . Уравнения (6.13) и (6.14) обобщают опытные данные с максимальным разбросом $\pm 15\%$ при $Ar = 1,4 \cdot 10^5...1,1 \cdot 10^7$ и $m/m_\varphi = 1,0...2,5$.

Нагрев, охлаждение и сушка зерна могут производиться в пневмотранспорте. Приведем результаты теплотометрического исследования теплообмена газозвеса со стенками канала [65]. В качестве зернового продукта использовали семена рапса ($d = 2,3$ мм) и алюмосиликатный катализатор ($d = 0,34$ и $2,5$ мм). В отдельных опытах использовалась смесь шариков катализатора обоих размеров. Концентрация твердой фазы μ менялась от 0 до 7 кг/кг; число Рейнольдса $Re = w_p d \nu_r^{-1}$ от $4 \cdot 10^4$ до $9 \cdot 10^4$. Опыты с воздухом $\mu = 0$ показали хорошее соответствие известным зависимостям для теплоотдачи при вынужденном движении.

При изменении μ для зерновых более крупных размеров в пределах $0,5...3,5$ (рис. 6.16) α не зависит от μ и ниже на $2...20\%$, чем для чистого воздуха. Для мелких частиц μ не влияет на α вплоть до $\mu = 6$. При дальнейшем возрастании растет и α . В пределах $\mu = 3,5...6,0$ для круп-

дисперсного материала это увеличение удовлетворительно описывается уравнением

$$Nu = Nu_0 (1 + 0,35 Re^{-0,15} \mu^{0,4}), \quad (6.15)$$

Nu_0 - число Нуссельта для теплообмена с чистым воздухом.

6.4. Теплофизические характеристики сельскохозяйственных продуктов

С помощью методик и установок, описанных в главе четвертой, исследованы эффективные теплофизические характеристики разнообразных сельскохозяйственных продуктов, начаты работы по изучению грунтов различных биологических тканей. Полученные данные опубликованы в ведомственных сборниках, например [62], отраслевых научно-технических журналах, в том числе в пособии [64] и т.п. В данном разделе приводятся интерполяционные формулы, полученные на основе статистической обработки массивов опытных данных. Эти формулы позволяют рассчитать теплопроводность λ в Вт/(м·К), массовую теплоемкость c в кДж/(кг·К) или объемную теплоемкость $c\rho$ в Дж/(м³·К), а также температуропроводность $a \cdot 10^6$ м²/с.

Основные ТФХ представлены в виде зависимости от температуры t °С, влажности w %, влажности на сухую массу w_c %, содержания сухих веществ φ %, жирности J %. Последний член каждого уравнения представляет собой среднее квадратичное отклонение искомой характеристики. Вначале приводится наименование продукта, затем диапазон изменения того или иного фактора и соответствующее расчетное уравнение.

Рис-зерно в плотном слое	$t = 3 \dots 50^\circ\text{C}$	$\lambda = 0,0616 + 1,2 \cdot 10^{-3} =$
	$w_c = 12 \dots 35 \%$	$= w_c + 4,3 \cdot 10^{-4} +$
		$+ 0,61 \cdot 10^{-5} =$
		$= w_c t \pm 0,0026$

$$c = 1,08 + 0,0184t$$

$$= w^c + 0,0117t \pm$$

$$\pm 0,072$$

Зеленый
солод
(слой в
одно зер-
но)

$$t = 30 \dots 60^\circ\text{C}, \quad \left\{ \begin{array}{l} \lambda = 0,073 + 5 \cdot 10^{-4}(t - 20) \pm 0,004 \\ a = 0,060 \pm 0,017 \end{array} \right.$$

$$w = 19 \%$$

$$t = 25 \dots 65^\circ\text{C} \quad \left\{ \begin{array}{l} \lambda = 0,140 + 1,3 \cdot 10^{-4}(t - 20) \pm 0,06 \\ a = 0,116 \pm 0,032 \end{array} \right.$$

$$w = 45 \%$$

$$t = 25 \dots 65^\circ\text{C}, \quad \left. \begin{array}{l} w = 19 \dots 45 \% \end{array} \right\} c\rho = -1,17 + 1 \cdot 10^{-2}(t - 20) \pm 28$$

Комби-
корм прес-
сованный

$$t = 20 \dots 80^\circ\text{C} \quad \lambda = 0,074 - 10^{-4} =$$

$$w = 5 \dots 30 \% \quad = (9,45 w + 1,42 t + 1,61 t + 0,55 w) \pm 0,007$$

$$c\rho = 0,396 + 0,02t + 0,037w \pm 0,07$$

Зерновая
барда

$$t = 10 \dots 80^\circ\text{C} \quad \lambda = 0,576 + 10^{-4}(10,0 - 1,54\varphi - 0,16t) \pm 0,02$$

$$\varphi = 5 \dots 20 \%$$

Квасное
сусло

$$t = 20 \dots 80^\circ\text{C} \quad \lambda = 0,588 - 10^{-4}(10,0 + 40,7\varphi + 0,19\varphi^2 - 263t\varphi) \pm 0,0008$$

$$w = 5 \dots 75 \%$$

$$c\rho = 4,183 - 10^{-4}(9,88t + 0,14t\varphi) \pm 0,131$$

Мякоть
сливы

$$t = 25 \dots 75^\circ\text{C} \quad \lambda = 0,523 \pm 0,26$$

$$c\rho = 4,60 - 0,02(t - 25) \pm 0,156$$

Венгерс-
кая

$$a = [8,80 - 0,038(t - 25)] - 1 \pm 0,01$$

Мякоть
вишни

$$t = 25 \dots 75^\circ\text{C} \quad \lambda = 0,505 \pm 0,044$$

$$c\rho = 4,36 + 0,025(t - 25) \pm 0,13$$

бская		$a = [8,62 + 0,05 (t - 25)]^{-1} \pm 0,012$
овая	$t = 25 \dots 75^\circ\text{C}$	$\lambda = 0,575 \pm 0,042$
ляни-		$c\rho = 3,0 + 0,25 (t - 25)^{0,5} \pm 0,27$
ктория		$a = [5,2 + 0,44 (t - 25)^{0,5}]^{-1} \pm 0,02$
кость	$t = 25 \dots 60^\circ\text{C}$	$\lambda = 0,490 + 0,02$
ока		$(t - 25) \pm 0,088$
ава		$c\rho = 4,05 + 0,016 (t - 25) \pm 0,21$
оди-		$a = 0,121 \pm 0,036$
ым		
кость	$t = 25 \dots 80^\circ\text{C}$	$\lambda = 0,415 + 0,03 (t - 25) \pm 0,035$
тра		$c\rho = 6,11 - 0,032 (t - 25) \pm 0,605$
орог	$t = 20 \dots 80^\circ\text{C}$	$\lambda = 0,430 + 0,0075 (t - 20) \pm 0,055$
естьян-	$X = 8 \%$	$c\rho = 2,0 - 0,025 (t - 20) \pm 0,37$
ий		
орог из	$t = 20 \dots 80^\circ\text{C}$	$\lambda = 0,250 + 0,0063 (t - 20) \pm 0,075$
тери-	$X = 18 \%$	$c\rho = 2,8 - 0,03 (t - 20) \pm 0,306$
анного		
шока		
ущен-	$t = 20 \dots 80^\circ\text{C}$	$\lambda = 0,588 - 10^{-4} (10,8t + 62\varphi + 0,09\varphi t) \pm 0,03$
мо-		
ко без		
аара	$\varphi = 10 \dots 30 \%$	$c\rho = 4,183 - 10^{-4} (64,5\varphi - 9,9t - 3,44\varphi t) \pm 0,305$
ивки,	$X = 2 \dots 80 \%$	$\lambda = 0,500 + 0,003 t - 1,72 \cdot 10^{-2} X (0,34 + 0,025 t) \pm 7,2 \cdot 10^{-3} X^2 (0,34 + 0,025 t)$
моко	$t = 0 \dots 15^\circ\text{C}$	

	$t = 15...75^{\circ}\text{C}$	$\lambda = 0,525 + 0,0014t - 1,72 \cdot 10^{-2} \text{ Ж} (0,30 + 0,0015t) + 7,2 \cdot 10^{-3} \text{ Ж}^2 (0,35 + 0,0015t)$
	$t = 37...80^{\circ}\text{C}$	$c = 1,761 + 0,0059t \text{ Ж} + (3,914 + 0,0015t) - 100 \text{ Ж}) \pm 0,106$
Мясо говяжье	$t = 0...70^{\circ}\text{C}$	$\lambda = 0,470 + 0,00156t$ $a = 0,256 - 55(516 + t)$ $c_p = 3,15 + 0,0061t$
свиное	$t = -20...+2,5^{\circ}\text{C}$	$c_p = (0,04 t - 0,074)$
говяжье	$t = -20...-2,5^{\circ}\text{C}$	$\lambda = 0,969 - 0,01t$
свиное	$t = -20...-2,5^{\circ}\text{C}$	$\lambda = 0,856 - 0,001t$

Такие сравнительно простые интерполяционные формулы можно получить не для всех продуктов сельского хозяйственного производства. Например, молочный жир имеет различные λ и c при одной и той же температуре, причем если по λ отличие составляет около 10 %, то по c - до 50 % [64]. Эти отличия зависят от того, проходит жир процесс нагрева или охлаждения. Явление теплового гистерезиса можно объяснить тем, что при плавлении и затвердевании жира образуются комплексы триглицеридов с разной энергией связи, причем эти комплексы по-разному располагаются в жире.

Теплометрический метод в данном случае оказывается пригодным для определения доли затвердевшего жира - эти данные необходимы в производстве сливочного масла [64].

7. ТЕПЛОМЕТРИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

7.1. Теплометрия ограждающих конструкций сельскохозяйственных производственных помещений

Ограждающие конструкции защищают помещение от посредственного воздействия окружающей атмосферы. Из-за ограждения происходит потеря теплоты в зимнее время и перегрев помещения в летний период года.

Ограждения, кроме того, поддерживают в помещении требуемый температурно-влажностный режим.

Условия теплообмена на внутренней поверхности и из-за ограждения сельскохозяйственных производственных помещений существенно отличаются от этих условий в жилых и промышленных помещениях. Так, в животноводческих помещениях интенсивность лучистого потока, направленная к внутренним поверхностям, существенно больше, чем в жилых зданиях. Ограждающие конструкции сооружений защищенного грунта обладают малым сопротивлением теплопередаче R_0 , К/Вт.

Нормативные значения термических сопротивлений [7, 53] не всегда выдерживают при сооружении сельскохозяйственных зданий. Кроме того, при длительной эксплуатации значения меняются. К примеру, в процессе жизнедеятельности животных и птиц в воздух помещения поступает влага. Биохимические явления в подстилке и навозе также влияют на тепловой и влажностный режимы помещения. Вследствие этого влажность на фермах, как правило, в процессе эксплуатации растет, что приводит к уменьшению их сопротивления теплопередаче. С целью определения действительных значений R_0 был обследован ряд сельскохозяйственных зданий Киевской области, находящихся в эксплуатации от 3 до 10 лет [48]. В процессе обследования экспериментально определялись плотность тепловых потоков, проходящих через наружные стены в окружающую среду, температуры воздуха внутри и снаружи здания, толщина стен.

Значения плотности теплового потока q_z , Вт/м² находились контактнм способом с помощью переносного прибора-измерителя тепловых потоков ИТП-11, разработанного в Институте технической теплофизики АН Украины. Так как термическое сопротивление датчика теплового потока прибора ИТП-11 пренебрежимо мало по сравнению с термическим сопротивлением стен, то оно не принималось во внимание. По той же причине размеры датчика в плоскости стены также не влияют на ее температурное поле.

По значениям термических сопротивлений материала стен и коэффициентов теплообмена, рекомендованных СНиП 11-3-79^{XX} [53], находились расчетные (т.е. требуемые по нормам) величины плотности теплового потока q_p , проходящего через стены.

Из приведенной таблицы следует, что действительные значения термических сопротивлений наружных стен обследованных зданий немного меньше сопротивлений, определяемых по нормативным данным.

Наружные стены животноводческих зданий составляют порядка 40...42 % общей площади ограждающих конструкций. Поэтому при низких значениях термических сопротивлений наружных стен потери теплоты из помещения будут незначительны.

Для условий Киевской области расчетная наружная температура для вентиляции $t_{н}^{\delta}$ равна -10°C . Температуру воздуха в помещении коровника примем в значении $t_{в} = 12^{\circ}\text{C}$. Отопительный период равен 187 суткам. Для таких исходных данных разница в потерях теплоты через наружные стены между экспериментальными и расчетными величинами составит 161900 ... 428900 МДж, что эквивалентно дополнительным затратам 5,5...14,5 т условного топлива.

Аналогичные исследования проводились в Белостокском политехническом институте. В животноводстве Польши большую роль играет овцеводство. Помещения для содержания овец в основном не отапливаются и имеют легкие ограждающие конструкции. Поэтому очень важно точно определять их теплофизические характеристики. Температуру гладкой твердой поверхности ограждения можно измерять как контактнм, так и

Наименование помещения	Материал стен	Толщина стен, м	Теплопроводность стен λ , Вт/(м·К)	Температура наружного воздуха t_n , °С	Температура воздуха в помещении $t_{в}$, °С	Плотность теплового потока q , Вт/м ²		Термическое сопротивление стен R , м ² К/Вт	
						экспериментальная	расчетная	экспериментальное	расчетное
Коровник № 1	красный кирпич	0,36	0,696	-5	+16	45,0	29,7	0,3	0,49
Коровник № 2	штукатур, шлакобетон	0,03	0,93	+8	+15	12,8	9,72	0,388	0,62
Свинарник	силикатный кирпич	0,24	0,87	18	+14	23,0	13,8	0,1	0,76

бесконтактными способами. В проводимых исследованиях использовался контактный метод. Для этого на поверхность ограждений наклеивали датчики тепломера, при помощи которых определяли величину теплового потока.

Опыты показали [19], что действительные значения коэффициентов теплопередачи ограждающих конструкций существенно отличаются от предусмотренных проектными нормами. Так, для овчарни с молодняком они больше: для продольных стен – на 27 %, торцевых – на 21 %, потолка – на 17 % и дверей – на 74 %; в овчарне для маток с ягнятами: для продольных стен – на 15 %, торцевых – на 62 %, потолка – на 5 %.

Несоответствие действительных и заложенных в проекте коэффициентов теплопередачи приводит к большим потерям тепла и к повышению влажности воздуха в помещениях для овец. Постоянная же конденсация влаги на внутренних поверхностях ограждений вызывает их переувлажнение.

На тепловой режим внутри помещения также значительно влияют потери тепла через пол. Опыты, проведенные при наружных температурах воздуха от -20°C до 0°C , показали, что здесь разница коэффициентов теплопередачи для эксплуатируемых зданий и заложенных в проекте составляет для овчарни с матками 10 % с молодняком – 20 % [53].

Выполненные исследования, основанные на методе контактной теплотермии, указывают на необходимость введения более жестких требований к строительству сельскохозяйственных зданий как на стадии проектирования и постройки, так и во время эксплуатации. Периодический контроль сопротивлений теплопередачи стен с помощью теплотермической аппаратуры и сравнение полученных значений с заложенными данными позволило бы судить о качестве эксплуатации зданий и принять своевременные меры по уменьшению потерь теплоты. Кроме того, следует предусмотреть нормативные термические сопротивления ограждений сельскохозяйственных производственных помещений в сторону увеличения, что может дать существенную экономию теплоты при эксплуатации зданий. Эффективным мо-

быть использование вентилируемых стен и энерго-сберегающих экранов.

Для уменьшения потерь теплоты в помещениях применяют вентилируемые ограждения конструкции. Их изготавливают либо в виде воздушных сплошных щелей в стенах, либо в виде круглого или прямоугольного сечения каналов, расположенных в ограждении с определенным шагом. Получаемые таким образом воздушные прослойки являются хорошим изоляционным слоем для ограждения. При воздушной системе отопления эти каналы или щели могут быть использованы для подачи воздуха в помещение. Это приводит к уменьшению расхода теплоты на подогрев воздуха.

Подобная отопительно-вентиляционная система может быть как естественной, так и принудительной. В последнем случае рекомендуется подавать через каналы предварительно подогретый воздух, что снижает теплопотери и уменьшает влажность стен.

На базе климатического комплекса Киевского зонального научно-исследовательского института экспериментального проектирования (КиевЗНИИЭП) были проведены исследования фрагмента ограждения размером 6х3х0,35 м. В нем размещены два типа каналов: ближе к внутренней ("а") или к наружной поверхности ("б") стены (рис. 7.1)^х.

Климатический комплекс позволяет имитировать условия внутри помещения и снаружи. Между теплым (внутренние условия) и холодным (наружные условия) отсеками размещен испытываемый фрагмент ограждения. Температура внутри теплого отсека равнялась 16...18°C, в холодном – минус 26°C.

Плотность теплового потока, проникающего через ограждения, измерялась контактными тепломерами конструкции ИТТФ АН Украины. На рис. 7.1 цифрами указаны места установки теплометрической аппаратуры.

Опыты проводились для следующих случаев: 1) каналы закрыты (невентилируемые каналы); 2) движение воздуха в каналах происходит за счет естествен-

^{х/} В проведении экспериментов принимала участие А.К. Абубакирова.

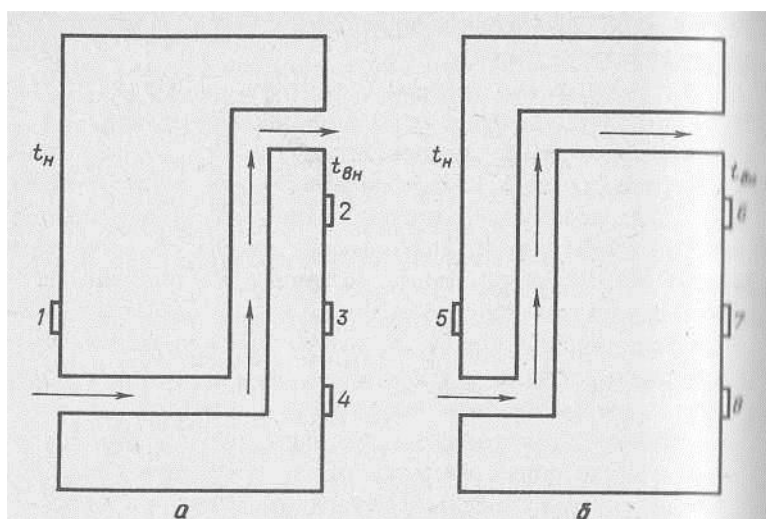


Рис. 7.1. Схема расположения вентилируемых каналов /ближе к внутренней поверхности /а/ и к внешней поверхности /б/ ограждения/

ной вентиляции; 3) принудительное движение подогретого воздуха в каналах.

При естественной вентиляции в канал поступает холодный воздух при температуре $t_H = -23,8^\circ\text{C}$. Температура воздуха в выходном сечении канала, т.е. температура приточного воздуха в помещение $t_{\text{п}} = -4,3^\circ\text{C}$.

Из указанных в таблице данных можно сделать следующие выводы.

В каналах холодного воздуха (естественная вентиляция помещения) теплотери через вентилируемое ограждение уменьшаются по высоте. Это объясняется тем, что при практически постоянной температуре в помещении температура воздуха в канале растет по мере его движения, в данном случае от $23,8^\circ\text{C}$ до $43,3^\circ\text{C}$.

В каналах, расположенных ближе к внутренней поверхности ограждения (вариант конструкции "а"), потери теплоты больше.

При подаче через каналы подогретого воздуха потери теплоты помещения тем меньше, чем ближе они

расположены к внутренней поверхности ограждения. Потери растут по высоте помещения, так как по мере передвижения воздуха в канале его температура падает.

В тех случаях, когда канал расположен ближе к внутренней поверхности ограждения (вариант конструкции "а"), в нижней части ограждения тепловой поток направлен от канала к помещению. На определенной высоте направление теплового потока меняется, достигая наибольшего значения в верхней части стены. Такое расположение канала дает возможность уменьшить потери теплоты.

Для уменьшения теплоотвода от горячего воздуха в окружающую среду рекомендуется установить слой изоляции между каналами и наружной поверхностью ограждения.

Примечательно, что при подаче через канал теплового воздуха (вариант конструкции "а") в места расположения животных теплота от ограждения поступает в помещение. В этом случае нижняя часть ограждения выполняет роль системы панельно-лучистого отопления, создавая благоприятные условия для содержания животных.

Аналогичные исследования были выполнены для чердачных перекрытий животноводческих помещений, в которых для уменьшения теплопотерь использовались местные изоляционные материалы. Для этой цели в чердачных перекрытиях ферм были оборудованы экспериментальные участки 2,5x2,5 м, на которые укладывался слой теплоизоляционных материалов (древесные опилки, копра льна). Опыты проводились в одном случае при наличии пароизоляции, в другом — без нее^{х/}. В качестве пароизоляции использовался рубероид.

Для определения значения тепловых потоков q , Вт/м² использовались тепломеры ИТП-11, которые устанавливались как со стороны помещения, так и со стороны чердака. Данные замеров приведены в табл. 7.3.

^{х/} В проведении экспериментов принимала участие М.А. Камс.

Место расположения животного-водческого помещения	Вид утеплителя и способ установки	Толщина слоя, мм	Разность температур в помещении и на чердаке, °C	Тепловой поток q , Вт/м ²	Термическое сопротивление перекрытия R_n , м ² К/Вт	Место установки датчика ИТП-11
Лаане	опилки с пароизоляцией	60	15,0	7,28	2,06	чердак в здании
				5,51	2,72	
Киума	опилки без пароизоляции	60	15,0	5,92	2,95	то же
				8,18	1,83	
	опилки с пароизоляцией	90	15,6	3,43	4,55	"-"
				2,17	7,19	
Ребасте	опилки без пароизоляции	90	15,6	4,70	3,32	"-"
				1,31	11,9	
	льнокостра с пароизоляцией	130	25,6	3,25	7,88	"-"
				1,94	13,19	
льнокостра без пароизоляции	130	25,6	4,02	6,37	"-"	
			3,52	7,27		

Использование местных изоляционных материалов заметно уменьшает теплотери через перекрытие фазы. При этом, как показали исследования, можно обойтись естественной вентиляцией без дополнительного подогрева воздуха.

Пароизоляционный слой увеличивает сопротивление теплопередаче. Однако следует отдать предпочтение схеме без пароизоляции, так как при этом заметно увеличивается срок службы перекрытия.

Теплотери через ограждающие конструкции теплиц существенно снижаются при применении стационарных или трансформирующих экранов. Опыт использования таких экранов за рубежом показывает, что экономия энергии на отопление теплиц при этом составляет 40...50 % [47].

Степень эффективности энергосберегающих экранов зависит от расстояния между остеклением теплицы и термоэкраном. Приведенные в литературе данные [18] не обосновывают эту величину.

С целью определения оптимальных условий использования экранов в термобарокамере проводились испытания элемента ограждения теплицы с подвижным пленочным экраном. Климатический комплекс позволяет смоделировать также влияние ветра на теплоотвод от наружной поверхности теплицы^х.

Температуру наружного воздуха изменяли от +5°C до -25°C с интервалом 5°C, а в рабочей зоне теплицы ее поддерживали постоянной (+18°C). Установленным в камере вентилятором создавалась скорость ветрового напора от 0 до 6 м/с. Расстояние между остеклением и экраном регулировали от 20 до 120 мм с интервалом 20 мм.

Значения температур и тепловых потоков фиксировались внутри и снаружи теплицы, на остеклении, экране, причем внутри воздушной прослойки — с помощью контактных тепломеров и термопар.

^{х/} Раздел, посвященный теплотерии теплиц с энергосберегающим экраном, написан совместно с К.А. Левенковой.

Данные эксперимента показали существенную энергосберегающую роль экрана. При положительных наружных температурах воздуха экран способствует увеличению температуры в зоне ограждения на 8–9°C. При ветре и низких температурах теплозащитная роль экрана возрастала. Например, при скорости ветра 3 м/с и наружной температуре –25°C на внутренней поверхности остекления она составляла –23,9°C, а на поверхности экрана +1,2°C. При наружной температуре воздуха –15°C и скорости ветра 6 м/с температура поверхности пленки в конструкциях с однослойным экраном составила +4,41°C, а с двухслойным – +10,6°C.

Результаты замеров для однослойной пленки при значениях δ , равных 40, 80 и 120 мм, показаны на рис. 7.2.

Из приведенных графиков следует, что энергосберегающий эффект пленки тем больше, чем выше значение разности температур в теплице и снаружи. Расстояние оказывает слабое влияние на закономерность изменения температуры. Данные, полученные для $\delta_2 = 80$ мм и $\delta_3 = 120$ мм, незначительно отличаются от данных при $\delta_1 = 40$ мм.

Графические зависимости $t = f(\delta)$ при установке двухслойного экрана изображены на рис. 7.3. Сопоставляя кривые, приведенные на рис. 7.2 и 7.3, приходим к выводу, что при использовании двухслойной пленки эффект энергосодержания выше.

Зависимость плотности тепловых потоков q , Вт/м² от значения наружной температуры при постоянной температуре в теплице $t_g = 22^\circ\text{C}$ показана на рис. 7.4. Величина q растет с изменением значения $\Delta t = t_g - t_n$. Представленные графики указывают на количественные значения этой зависимости. Можно сделать также вывод, что расстояние δ между энергосберегающим экраном и остеклением теплицы мало влияет на величину тепловых потерь через ограждающую конструкцию. Поэтому следует рекомендовать значение $\delta = 40$ мм.

Данные, полученные опытным путем, были подтверждены теоретическими результатами определения

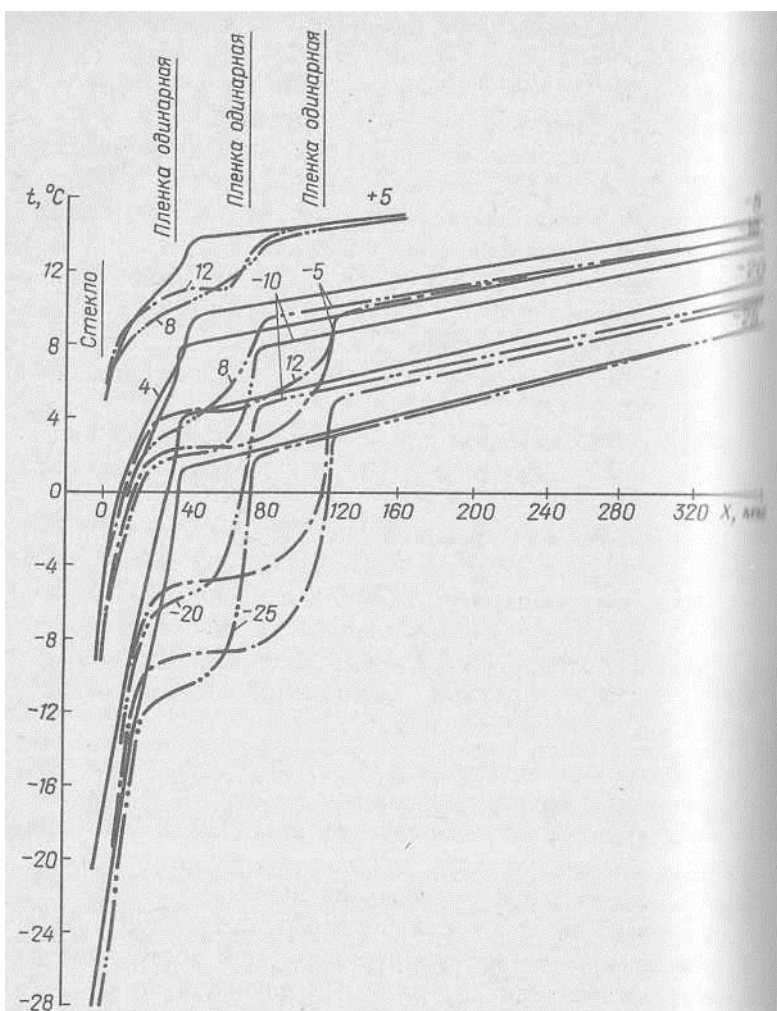


Рис. 7.2. Закономерность изменения температуры в слое $t = f\left(\frac{x}{\xi}\right)$, для различных значений наружной температуры /указаны на кривых/ при установке одного слойного экрана: $\delta_c = 40$ мм; $\delta_c = 80$ мм; $\delta_c = 120$ мм;

температурных полей и тепловых потоков в зоне теплолицы, где используются экраны.

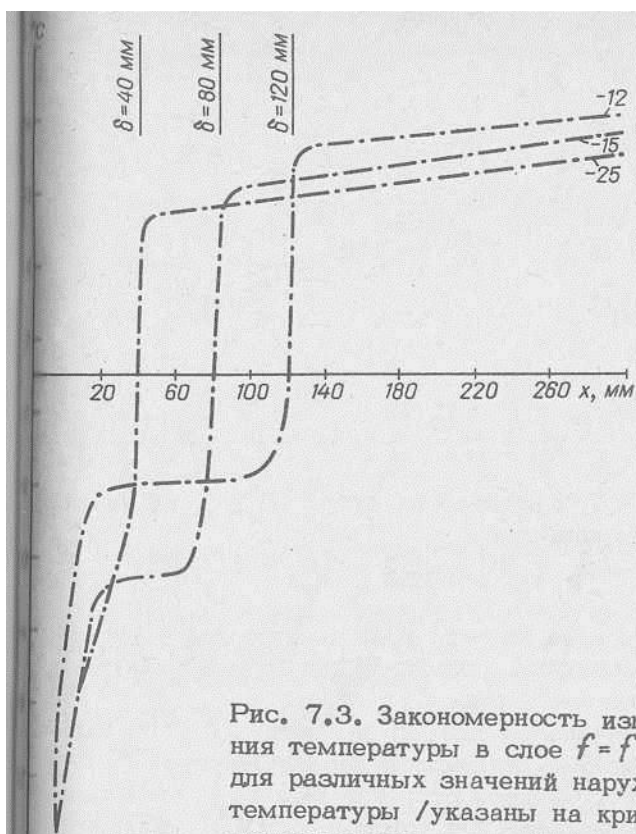


Рис. 7.3. Закономерность изменения температуры в слое $f = f(x)$ для различных значений наружной температуры /указаны на кривых/ при установке двухслойного экрана

Теплообмен в пространстве между экраном и ос-
 лением теплицы может происходить благодаря теп-
 проводности и конвекции в зависимости от отноше-
 ния H/δ , где H – высота, а δ – ширина слоя,
 также от значений числа Рэлея. При более тщатель-
 ном анализе следует учитывать, что граница структур
 теплопроводность или конвективное движение) и ре-
 жимов (по числу Рэлея) связаны не только с геомет-
 рией области, но и со свойствами среды в изучаемой
 части. Для исследуемого случая ($H/\delta=3$) без осо-
 бых погрешности можно принять, что передача теплоты
 через слой между экраном и наружным ограждением
 теплицы происходит благодаря теплопроводности.

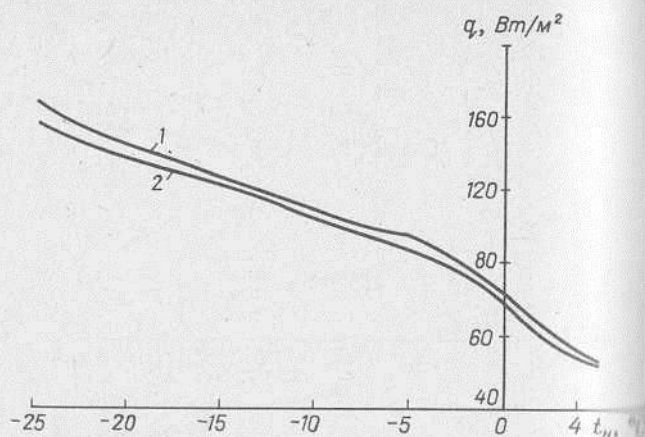


Рис. 7.4. Зависимость $q = f(t_n)$ для однослойного экрана при:

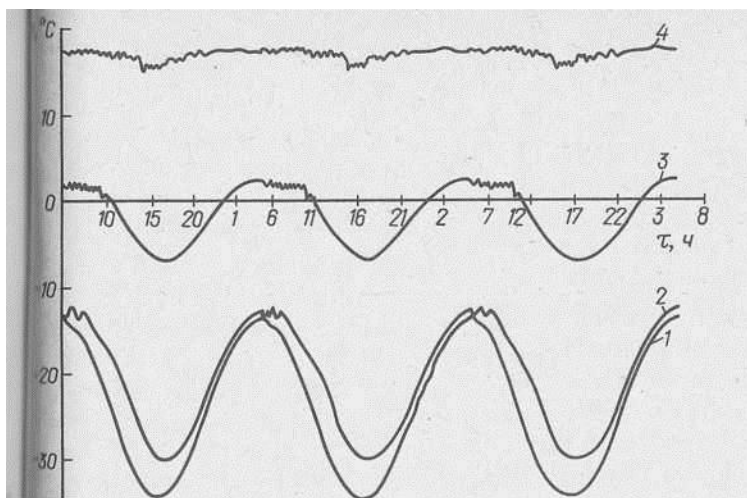
1 - $\delta_c = 40$ мм; 2 - $\delta_c = 120$ мм

В основе расчета принято уравнение одномерной нестационарной теплопроводности при граничных условиях третьего рода [21].

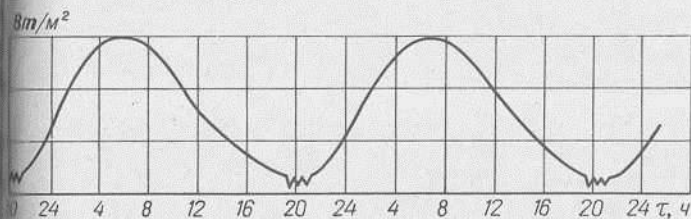
В начальный момент времени ($\tau = 0$) имеется произвольное распределение температур $F_i(x)$ по сечению. С одной стороны слоя ($x = 0$) находится среда, температура которой $t_i(\tau)$ является произвольной функцией времени $\varphi_i(\tau)$. С другой стороны слоя ($x = \delta$) температура среды изменяется по произвольному закону $t_n(\tau) = \varphi_n(\tau)$. Начальное состояние принято стационарное распределение температур.

Решение исходной системы уравнений выполняется отдельно для каждого слоя i методом малого параметра и конечных интегральных преобразований, расчет принималось, что количество слоев равно 4. Ограждение теплицы, воздушный слой между ограждением и экраном, экран.

Исходными данными являются параметры, характеризующие конструкцию, теплофизические характеристики трех слоев, точки расчета температур, толщины слоев, коэффициенты теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях, контактные сопротивления, и



7.5. Закономерность изменения температуры $f(\tau)$ для теплицы с экраном при $\delta_c = 40$ мм: 1 – наружная температура; 2 – на внутренней поверхности ограждения; 3 – в середине слоя между экраном и остеклением теплицы; 4 – на поверхности стекла со стороны воздушной прослойки.



7.6. Закономерность изменения плотности теплового потока через слой между экраном и остеклением

метры расчетной температуры. Для контроля правильности ввода исходных данных организована их проверка. Расчеты выполнялись для нескольких вариантов положения экрана относительно ограждения теплицы. Результаты расчета для $\delta = 40$ мм приведены на рис. 7.5 и 7.6 для района г. Киева. Изменение

температуры происходит по гармоническому закону. Температура в теплице принята равной 22°C .

Из рис. 7.5 следует, что температура на внутренней поверхности стеклянного ограждения (кривая 1) мало отличается от температуры на его наружной поверхности. В середине воздушного слоя температура (кривая 3) изменяется от -7°C до $+3^{\circ}\text{C}$, а на внутренней поверхности экрана (кривая 4) она в течение суток практически постоянна и равна $16...18^{\circ}\text{C}$.

В течение суток плотность теплового потока q изменяется от 19 до 29 Вт/м^2 (рис. 7.6). Из расчетов следует, что в зоне установки экрана величина тепловых потерь через ограждение теплицы примерно в 10 раз меньше, чем на участке, где нет экрана.

7.2. Теплометрия сельскохозяйственных энергетических установок

7.2.1. Основные сведения

В сельскохозяйственном производстве находится в эксплуатации большое количество машин, оборудованных тепловыми энергетическими установками – двигателями внутреннего сгорания (ДВС). В первую очередь, это тракторы, комбайны и автомобили. Тепловое состояние двигателей сельскохозяйственных машин зависит от температуры их элементов и деталей. Своевременная диагностика температуры поверхности деталей двигателя, системы передачи и узлов машины способствует повышению их надежности и сроков безаварийной эксплуатации.

Информацию о температурном состоянии ДВС и узлов сельскохозяйственных машин получают расчетным или экспериментальным путем. В практике эксплуатации машин более приемлемы экспериментальные методы. К ним относят методы электроимитационного, контактной и бесконтактной термометрии. Электроимитационное моделирование сочетают с расчетным методом и используют главным образом в научных исследованиях и в проектной работе. Метод красок вследствие невысокой точности измерения не получил широкого распространения. При испытаниях и исследованиях эксплу-

ющихся ДВС и элементов машин в большинстве случаев обращаются к контактной и бесконтактной теплотехнике. Каждый из этих методов обладает преимуществами и недостатками. При измерении температуры энергетических установок сельскохозяйственных машин положительной стороной контактного метода является возможность локальных измерений температуры площадью до 1 мм^2 , высокая точность, широкий диапазон измерений. Однако для сельскохозяйственно-производства, где часто необходима экспресс-информация, в т.ч. и в полевых условиях, положительные стороны контактного метода утрачивают свое значение. Так, для надежного измерения температуры в какой-то точке слой термопар или термометр сопротивления должны надежно крепиться к измеряемой поверхности, что не всегда возможно сделать, учитывая специфику как объекта исследования, так и условия его эксплуатации. Первичные температурные датчики стандартных системах контактного типа инерционны, что удлиняет процесс диагностики, а подчас является источником искажений получаемой информации. Существующие в настоящее время стационарные системы температурной диагностики тракторных и комбайновых двигателей при помощи контактных первичных датчиков не получили широкого распространения в силу их громоздкости, сложности, дороговизны, необходимости длительного их монтажа. Выпускаемые промышленностью недорогие компактные автономные датчики имеют тот недостаток, что на точность их показаний влияют вибрация измеряемой поверхности, сила прижима, так как контакт с поверхностью объекта измерений производится вручную.

Бесконтактное измерение температуры осуществляют пирометрами, т.е. приборами, позволяющими определять температуру измеряемой поверхности по интенсивности излучаемой ею энергии.

По методу измерения излучения их делят на пирометры энергетические и пирометры спектрального распределения (цветные). Последние используют для измерения повышенных температур ($200 \dots 3000^\circ\text{C}$). Так как температура наружных поверхностей деталей

энергетических установок сельскохозяйственных машин не превышает 200°C , то для измерения таких значений температур следует применять энергетические низкотемпературные пирометры. Такие пирометры разработаны в СНГ и за рубежом [6, 277]. Из отечественных приборов предъявляемым требованиям отвечает пирометр ППТ-142 Каменец-Подольского приборостроительного завода. Диапазон измеряемых температур колеблется от $+30$ до $+300^{\circ}\text{C}$. Номинальное рабочее расстояние – 1 м. При этом диаметр круга, с которого прибор может получить информацию, равен 200 м. Прибор работоспособен при температуре окружающей среды в диапазоне $5\dots100^{\circ}\text{C}$. Масса пирометра, состоящего из двух частей (первичного датчика и вторичного измерительного преобразователя), 12 кг. Для работы пирометра необходимо питание 220 В.

Из приведенных данных следует, что пирометр ППТ-142, предназначенный для решения общетехнических задач, мало пригоден для температурной экспресс-диагностики энергетических установок сельскохозяйственных машин. К недостаткам указанного пирометра следует отнести: большой диаметр обнаружительной окружности, что не позволяет производить измерения температуры локальных участков ДВС; завышенную массу прибора; неудобство использования при диагностике мобильных машин. В связи с этим на кафедре теплотехники УСХА разработан пирометр, предназначенный для экспресс-диагностики теплового состояния ДВС сельскохозяйственных машин.

7.2.2. Конструкция и основные характеристики пирометра

При разработке прибора использован опыт ИТТФ АН Украины в создании низкотемпературных термодиагностических энергетических пирометров [8]. По оптической системе прибор относится к диафрагменным пирометрам. Принципиальная схема телескопа диафрагменного пирометра изображена на рис. 7.7.

Работа диафрагменного пирометра состоит в следующем. Излучение объекта измерения фокусируется

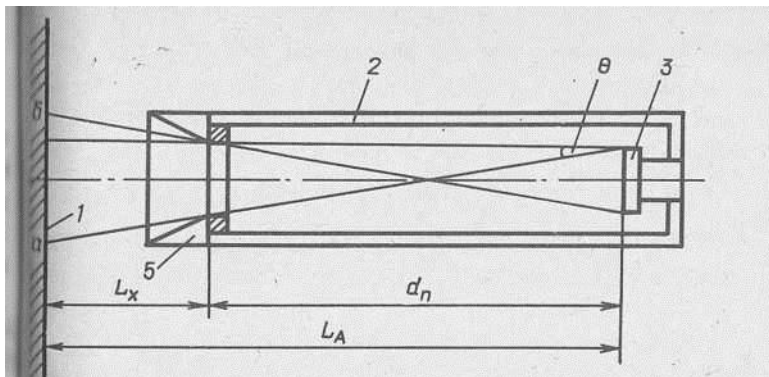


рис. 7.7. Принципиальная схема телескопа диафрагменного пирометра

тической системой телескопа на приемную площадь приемника излучения. Часть энергии излучения отражается или поглощается входным окном. Остальное излучение, падающее на приемник, большей частью поглощается его приемной поверхностью, и незначительная часть отражается в сторону боковых стенок телескопа и входного окна.

Излучение единицы поверхности, как известно, рав-

$$E = \epsilon_1 \sigma T_0^4, \quad (7.1)$$

где ϵ - степень черноты излучающей поверхности излучения; σ - постоянная Стефана-Больцмана; T_0 - температура излучающего объекта.

С учетом излучения фона радиационная энергия, излучаемая в сторону приемника телескопа,

$$E_1 = \epsilon_1 \sigma T_0^4 + (1 - \epsilon_1) \sigma T_\phi^4, \quad (7.2)$$

где T_ϕ - температура фона.

Из этой энергии до приемника дойдет только часть, заключенная в телесный угол [9, 10]

$$q_2 = \epsilon_1 \sigma T_0^4 \sin^2 \theta + (1 - \epsilon_1) \sigma T_\phi^4 \sin^2 \theta, \quad (7.3)$$

где θ - плоский угол, под которым виден из любой точки приемной поверхности диаметр входного окна диафрагмы.

Кроме энергии для измерения объекта, на приемник попадает энергия излучения стенок корпуса телескопа из телесного угла 2θ за вычетом телесного угла Ω ,

$$q_3 = \epsilon_k \sigma T_k^4 (1 - \sin^2 \theta), \quad (7.4)$$

где ϵ_k - коэффициент интегрального излучения корпуса телескопа пирометра, T_k - температура корпуса телескопа.

В свою очередь поверхность приемника, воспринимающая излучение, излучает по полусфере энергию на сторону стенок корпуса и входного окна.

$$q_4 = \epsilon_n \sigma T_n^4, \quad (7.5)$$

где ϵ_n - интегральный коэффициент излучения поверхности приемника; T_n - температура приемной поверхности.

Принцип работы термоэлектрических тепловых приемников излучения описан в гл. 3. Здесь лишь отметить, что в разработанном пирометре температура корпуса приемника равна температуре корпуса телескопа пирометра, который при температурной стабилизации прибора нагрет до температуры окружающей среды T_0 .

Результирующая энергия излучения, усвоенная приемником и вызвавшая повышение температуры чувствительного элемента приемника, находится из выражения

$$Q_p = A_{np} (1 - \rho) \left\{ [A_n \epsilon_1 \sigma T_0^4 \sin^2 \theta + A_n (1 - \epsilon_1) \cdot \sigma T_0^4 \sin^2 \theta] + A_n \epsilon_k \sigma T_k^4 (1 - \sin^2 \theta) - \epsilon_n \sigma T_n^4 \right\}, \quad (7.6)$$

где A_{np} - воспринимающая поверхность приемника, $(1 - \rho)$ - степень ослабления радиации во входном окне пирометра.

Учитывая специальную конструкцию корпуса телескопа, приближающуюся по поглощательным свойствам к абсолютному черному телу (АЧТ), покрытие воспринимающей поверхности приемника и внутренней поверхности корпуса телескопа чернью с высоким коэффициентом поглощения можно принять

$$A_n = \epsilon_k = \epsilon_n = 1.$$

кроме того, примем, что при термической стабилизации

$$T_k = T_n = T_b,$$

тогда формула (7.6) упростится

$$Q_p = \beta A_{np} (1-\rho) \sin^2 \theta \left[\epsilon_1 (T_0^4 - T_\phi^4 + \frac{T_\phi^4}{\epsilon_1}) - T_b^4 \right]. \quad (7.7)$$

Если ввести понятие чувствительности, получим величину электрического сигнала, генерируемого приемником пирометра

$$E = R \beta A_{np} (1-\rho) \sin^2 \theta \left[\epsilon_1 (T_0^4 - T_\phi^4 + \frac{T_\phi^4}{\epsilon_1}) - T_b^4 \right]. \quad (7.8)$$

Разработанный пирометр используется для измерения температуры поверхностей, расположенных на небольшом удалении от входного окна телескопа, который к тому же имеет бленду, снижающую воздействие фона на измерение. В этом случае излучением фона можно пренебречь. После этого формула (7.8) примет вид

$$E = R \beta A_{np} (1-\rho) \sin^2 \theta (\epsilon_1 T_0^4 - T_b^4). \quad (7.9)$$

Отсюда видно, что для разработанного пирометра можно считать, что выходной электрический сигнал зависит от следующих переменных величин: чувствительности приемника, абсолютных температур объекта излучения и окружающего воздуха, степени черноты излучающего объекта. Чувствительность пирометра является переменной величиной. Она зависит от интенсивности падающего излучения (температуры излучателя). Зависимость сигнала пирометра от температуры окружающего воздуха была устранена введением системы термостабилизации. Степень черноты излучающего объекта учитывается при определении истинной температуры объекта по формуле

$$T_u = \frac{T_p}{\sqrt[4]{\epsilon}}, \quad (7.10)$$

где T_u — истинная температура излучающего объекта, T_p — радиационная температура объекта излучения.

Таким образом, при индивидуальной тарировке пирометров с целью получения непосредственной функциональной зависимости учитываются конструктивные осо-

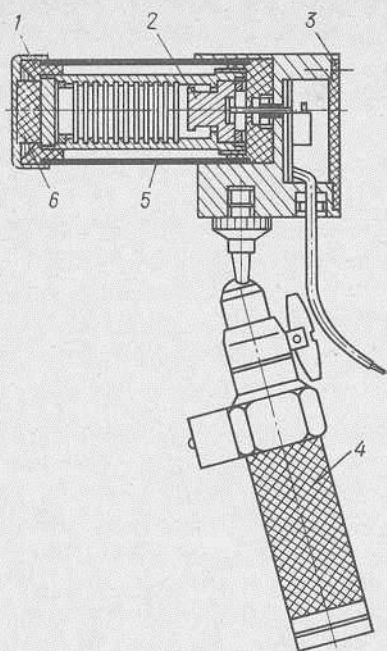


Рис. 7.8. Пирометр
низкотемпературный
ПНТЭ-15

бенности $A_{пр} \theta$, зависящие в определенных пределах от диапазона измеряемых температур объекта.

Непосредственное определение температуры исследуемой поверхности производится следующим образом. Электромагнитное излучение от исследуемой поверхности поступает во вторую бленду 1 (рис. 7.8), предназначенную для уменьшения действия посторонних источников излучения на результат измерения. Часть теплового излучения исследуемой поверхности, определяемая углом зрения телескопа, воздействует на чувствительный элемент приемника 2. Вырабатываемый термоэлектрическим преобразователем электрический сигнал, кроме интенсивности излучения измеряемой поверхности, зависит от температуры корпуса приемника, которая при термической стабилизации пирометра определяется температурой окружающего воздуха. Чтобы уменьшить влияние отклонения температуры окружающего воздуха на результат измерения, в пирометре предусмотрена система автокомпенсации, представляющая собой систему активных и термозависимых

дих сопротивлений, собранных по мостовой схеме. Сигнальная диагональ схемы термокомпенсации последовательно подключена к приемнику излучения. Схема термокомпенсации собрана на плате, установленной в полости корпуса пирометра. Снаружи схема термокомпенсации закрыта крышкой 3, предохраняющей от механических повреждений. На крышке закреплены система контактов, предназначенных для проверки элементов электрической схемы пирометра, контакты подключения дополнительных источников питания схемы автокомпенсации. Схема автокомпенсации питается от двух параллельно выключенных элементов "316", расположенных под крышкой 4. Кроме того, дополнительно для этой цели в рукоятке прибора устанавливаются резервные элементы питания. Помимо системы автокомпенсации, уменьшению влияния резко изменяющейся температуры окружающего воздуха служит двухстенная конструкция телескопа. Таким образом, внутренний корпус телескопа хорошо теплоизолирован от окружающей среды. Вследствие этого кратковременное изменение температуры окружающего воздуха практически не сказывается на результате измерений. С другой стороны, если предстоит длительные измерения при изменившейся температуре окружающего воздуха, необходима температурная стабилизация элементов пирометра в течение часа. Для удобства пользования пирометр имеет рукоятку, шарнирно соединенную с корпусом. Соединение рукоятки с прибором создает большое термическое сопротивление, исключаяющее воздействие руки исследователя на результат измерения. В нерабочем состоянии телескоп закрывается крышкой, препятствующей нагреву приемника. При этом образуется адиабатическая полость, благодаря чему сигнал пирометра быстро возвращается к нулевому значению.

7.2.3. Экспериментальные исследования характеристик пирометра

У изготовленных приборов были исследованы такие характеристики, как чувствительность, зависимость последней и показаний пирометра от расстояния до

объекта, зависимость сигнала пирометра от температуры его корпуса, и определены температурные характеристики. В процессе исследований проводились измерения пирометром температуры характерных элементов натурального дизеля. Результаты сопоставлялись с данными, полученными с помощью переносного электротермометра ЭТП-11 контактного типа.

Под чувствительностью пирометра подразумевается отношение выходного сигнала, выраженного в эффективных значениях напряжения, вырабатываемого пирометром в вольтах, к входному сигналу, задаваемому чаще всего в ваттах. Это отношение характеризует коэффициент преобразования или вольт-ваттную чувствительность. Величина входного сигнала теплового излучения объекта измерений может быть определена прямым методом с помощью датчика теплового потока или рассчитана косвенно по формуле Стефана-Больцмана

$$Q_0 = \frac{\epsilon \varphi (T_u^4 - T_0^4) A_0 A_B}{\pi L_A^2}, \quad (7.11)$$

где ϵ - приведенная степень черноты $\epsilon = \epsilon_n \cdot \epsilon_{об}$, ϵ_n - степень черноты приемной поверхности чувствительного элемента приемника, $\epsilon_{об}$ - степень черноты объекта излучения, A_0 - площадь поверхности объекта излучения, заключенная внутри обнаружительной окружности, A_B - воспринимающая поверхность чувствительного элемента, L_A - расстояние приемника от торца излучающей поверхности объекта до торца воспринимающей поверхности приемника, T_u - абсолютная температура объекта излучения, T_0 - абсолютная температура приемника для диафрагменного пирометров (может быть принята равной температуре окружающего воздуха).

При градуировке пирометров тепловой поток рассчитывался по формуле (7.11). В результате чувствительность $R = \frac{E}{Q}$ в пределах температуры излучающего объекта (33...270°C) соответственно изменялась в диапазоне 0,60...0,37 В/Вт, а удельная чувствительность - в диапазоне 6,70...4,06 В/Вт. Все измерения проведены на расстоянии пирометра от

лучающего диска 1,5...3,0 см. В этом диапазоне расстояний сигнал пирометра практически не изменялся при условии постоянства падающего излучения.

При градуировке пирометров в качестве излучателя использовался медный диск диаметром 98 мм и толщиной 4 мм, перфорированный несквозными отверстиями диаметром 3 мм. С измеряющей стороны диск покрывался специальным чернением (термостойкость до 300°C). С противоположной стороны плоскость диска разогревалась спиральным электроподогревателем. Степень черноты излучателя была определена экспериментально методом сравнения и равнялась 0,96. Температура окружающего воздуха при градуировке составляла 22°C. Температура излучателя измерялась вчеканенной в тело диска термопарой, предварительно протарированной. Сигнал термопары и сигнал пирометра определялись цифровым вольтметром Ш 4316. Температура излучателя устанавливалась регулированием тока питания электронагревателя с помощью автотрансформатора и вольтметра. Схема стенда для исследования характеристик пирометра приведена на рис. 7.9.

В результате экспериментальных исследований выяснено, что в диапазоне температур излучателя (30...270°C) чувствительность соответственно изменялась от значения 0,6 до 0,366 В/Вт, а удельная чувствительность – в пределах 6,66...4,06 В/Вт·м².

Зависимость чувствительности и показаний пирометра от расстояния до излучающего объекта проверялась в диапазоне расстояний от излучателя до входного торца телескопа $l_x = 1,5...8,5$ см. При этих расстояниях диаметр обнаружительной окружности еще существенно меньше диаметра излучающего диска.

Результаты исследований отражены на графике (рис. 7.10). Из графика видно, что сигнал пирометра постоянен в диапазоне $h = 15...30$ мм от излучаемой поверхности. В дальнейшем по мере увеличения h наблюдается уменьшение сигнала. Зависимость сигнала пирометра от температуры его корпуса исследовались в диапазоне температур окружающей среды – 3...+40°C. Температуры корпуса прибора выше 22°C

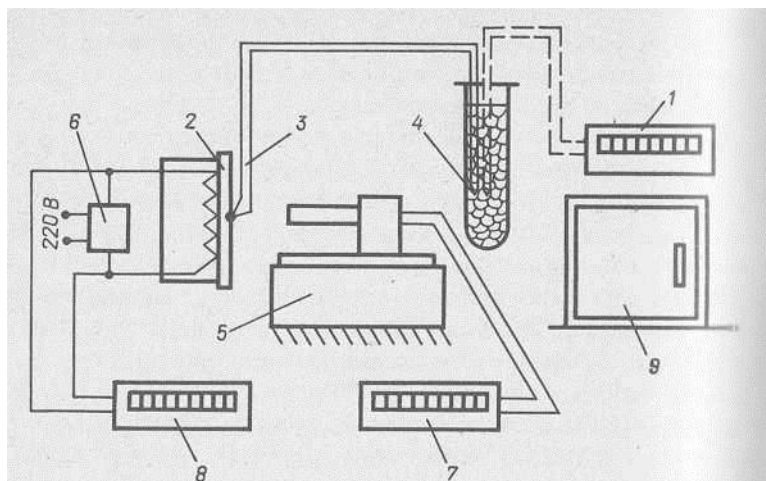


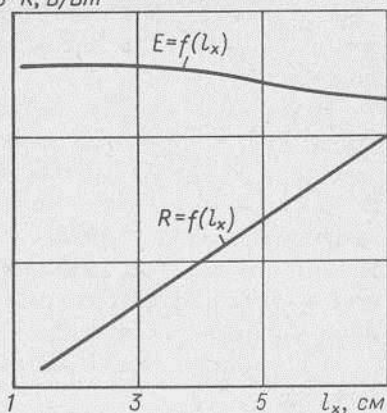
Рис. 7.9. Схема стенда для исследования характеристик пирометра:
 1 - вольтметр ВК2-20; 2 - излучатель; 3 - термопара; 4 - сосуд Дьюара; 5 - измеритель расстояний; 6 - автотрансформатор, 7 - вольтметр; 8 - исследуемый пирометр; 9 - термокамера

достигались выдержкой пирометров в термопаре СУП в течение не менее часа, более низкие - выдержкой пирометров в течение того же времени вне помещения в холодное время года. Испытания показали, что благодаря введению температурной компенсации относительная погрешность прибора при измерении объекта, нагретого до 110°C , не превышала 1 % в рабочем диапазоне температур окружающего воздуха.

Основной характеристикой пирометра является его температура или статистическая характеристика, т.е. зависимость сигнала пирометра от измеряемой температуры объекта. Измерения пирометром производились после достижения на излучателе стационарного температурного режима, который определялся по неизменности показаний ЭДС термопары, зачеканенной в излучателе. Измерения сигнала пирометра производились через 1-2 с после начала визирования исследуемой поверхности. При небольших температурных объектах

Рис. 7.10. Зависимость сигнала пирометра и чувствительности от расстояния до излучателя / $t_{\mu} = 110^{\circ}\text{C}$

$E, \text{ мВ}$ $R, \text{ В/Вт}$



расхождения близлежащих значений электрического сигнала пирометров, считываемых с цифрового вольтметра, было незначительным и вызывалось скорее всего колебаниями напряжения в сети. При повышенных температурах ($250 \dots 300^{\circ}\text{C}$) наблюдаются заметные флуктуации сигнала пирометра от среднего значения. Это явление вызвано температурными шумами приемника. Чтобы снизить погрешность измерения, вызванную температурными шумами приемника при повышенных температурах, уменьшался угол зрения телескопа. Для этого на телескоп со стороны входного окна отдавалась цилиндрическая надставка внутренним диаметром 37 мм и длиной $l = 69$ мм. Показания пирометра при этом уменьшались, однако стали стабильными. Абсолютное значение сигнала при температуре излучателя $t_{\mu} = 300^{\circ}\text{C}$ снизилось с 10 до 8,6 мВ, т.е. оставалось вполне достаточным для измерения цифровыми вольтметрами типа Щ 4314 и других марок. Тарировочная кривая в районе повышенных температур объекта с применением надставки определялась отдельно.

Анализ характеристик пирометров показал, что их температурная чувствительность переменна и в среднем изменяется от 20 мВ/град при $40 \dots 50^{\circ}\text{C}$ до 70 мВ/град для температур $270 \dots 300^{\circ}\text{C}$.

Благодаря использованию современных чувствительных элементов для приемников получены достаточно

высокие значения температурной чувствительности, которых ранее удавалось достигнуть усложнением конструкции пирометров путем применения оптических концентраторов [6, 20, 277.

Испытания пирометра на дизеле 148,5/11 были проведены с целью проверки работоспособности пирометра в реальных условиях работающего двигателя. В процессе испытаний определялась температура поверхности узлов и деталей дизеля, граничащих с окружающим воздухом, пирометром и контактным методом – электротермометром ЭТП-М. Измерение температур поверхностей дизеля производилось:

- 1) в месте соединения патрубка с корпусом глушителя;
- 2) в средней части корпуса выхлопного вентиля;
- 3) на поверхности выхлопного патрубка на расстоянии 20 мм от фланца крепления к крышке цилиндра;
- 4) на крышке цилиндра вблизи от выхлопного патрубка;
- 5) на поверхности блока цилиндров (в центре);
- 6) на корпусе водяного радиатора системы охлаждения дизеля;
- 7) на поверхности выпускного патрубка.

Измерения проводились при мощности дизеля 1; 1,5 и 2 кВт. В результате выполненных испытаний можно отметить удовлетворительное согласование данных, полученных с помощью пирометра и контактного электротермометра. Различия в показаниях укладываются в погрешности измерений, сделанных при помощи каждого из указанных приборов. Кроме того, необходимо учитывать некоторые чисто эксплуатационные факторы, которые также могли повлиять на результат измерений: вибрацию двигателя; существенные конвективные потоки, вызванные работой системы вентиляции бокса; форму измеряемых поверхностей. Вибрация измеряемых поверхностей практически не влияет на показания пирометра, что можно отнести к преимуществам бесконтактного метода измерения поверхностных температур. В то же время вибрация существенно затрудняет проведение измерений контактным электротермометром, поскольку нарушается постоян-

ный контакт датчика (электротермометра) с объектом измерений, что занижает показания прибора. Кривизна измеряемой поверхности оказывает влияние на результат измерений электроконтактным термометром. При наличии у измеряемой поверхности кривизны не удается получить надежный контакт между плоскостью чувствительного элемента датчика электротермометра и измеряемой поверхностью. Указанный недостаток не свойственен работе с пирометром. В целом разница показаний, полученных пирометром и электроконтактным термометром, колеблется в пределах 10 %.

Необходимо отметить и общие впечатления при сравнении работы двух приборов при натурных испытаниях двигателя. Измерения пирометром производятся в течение 1-2 с, что позволяет за короткое время "опросить" большое число точек двигателя. Измерения контактным прибором занимают гораздо больше времени, т.к. продолжительность каждого измерения должна быть не менее 1 мин. Таким образом, в результате экспериментальных, лабораторных, производственных исследований определены основные характеристики пирометра, которые подтвердили возможность использования его для экспресс-диагностики двигателей сельскохозяйственных машин.

7.2.4. Основные технические данные пирометра

1. Пределы измерения температуры поверхностей - 30...300°C.
2. Расстояние торца входного окна пирометра до измеряемой поверхности $l_x = 15...35$ мм.
3. Диаметр обнаружительной окружности - 30 мм.
4. Показатель визирования $k = 1,1$ при $l_x = 35$ мм.
5. Инерционность - не более 2 с.
6. Габаритные размеры - 240x135x70 мм.
7. Масса прибора - 0,7 кг.

7.3. Теплометрия биологических объектов

7.3.1. Общие сведения

Теплометрия биологических объектов – чрезвычайно широкая область, охватывающая такие направления как контроль и регулирование степени облученности растений в теплицах; бесконтактное измерение температуры грунта и листового покрова растений; измерение интенсивности лучистых потоков при облучении молодняка сельскохозяйственных животных и птицы источниками инфракрасного обогрева; исследование теплоотдачи животных и птицы с целью совершенствования систем микроклимата животноводческих и птицеводческих помещений; определение тепловыделения локальных участков тела животных с целью ранней диагностики заболеваний, например, мастита у коров; изучение процесса акклиматизации животных к сложным климатическим условиям. В настоящей главе изложены результаты исследований радиационным и термометрами тепловыделений сельскохозяйственными животными и температуры локальных участков их тела.

7.3.2. Теплоотдача тела животных

Поддержание термического гомеостаза у животных осуществляется за счет сохранения баланса между теплопродукцией тела и теплотой, отдаваемой в окружающую среду.

У животных процесс теплопродукции непосредственно связан с усвоением корма. Там, где условия содержания животных вызывают повышенные потери теплоты телом в окружающую среду, требуется или более интенсивная теплопродукция в процессе жизнедеятельности животных и, как следствие, повышение калорийности кормов за счет количественных и качественных показателей, или принятие мер к повышению приспособляемости животных к внешним условиям, их акклиматизации к низким температурам среды обитания.

Для обеспечения комфортного микроклимата в животноводческих помещениях необходимо знать количество теплоты, отдаваемой животными в окружающую

еду. В результате можно создать такие условия, при которых снижается расход кормов на единицу продукции, повышается продуктивность животных, снижается их заболеваемость, а также расход энергии на обогрев ферм.

При изменениях условий окружающей среды или приспособленности животных к внешним условиям у них нарушается кровообращение, дыхание, терморегуляция, газообмен и обмен веществ, что, в свою очередь, оказывает влияние на резистентность организма и на продуктивность. Исследованиями установлено, что продуктивность, например, молочных коров на 10 % определяется условиями окружающей среды и на 30 % – генетическими признаками. При изменении температуры окружающей среды от 5 до 35°C суточный привес свиней может изменяться от 0 до 1 кг, достигая максимального значения при $t = 15...17^{\circ}\text{C}$. При этом расход на 1 кг привеса изменяется примерно в два раза [16].

При проведении физиологических исследований и выполнении теплофизических расчетов животноводческих помещений применяют два способа определения количества теплоты, отдаваемой животными в окружающую среду. При первом способе измеряют общую теплоотдачу животных путем калориметрирования. Он имеет ряд недостатков: условия проведения исследований отличаются от естественных, что может привести к стрессовым состояниям животных; строительство калориметрических камер требует больших капиталовложений.

Второй способ, основанный на энергетическом балансе, определяемый экспериментально-теоретическим методом, более доступен для исследований и может быть проведен в естественных для животных условиях. В результате физиологических и теплофизических исследований разработаны методы определения отдельных составляющих уравнения энергетического баланса для животных [17, 22].

Количество теплоты $\Phi_{ж}, \text{Вт}$, отдаваемой поверхностью тела животного в окружающую среду, вычисляют по уравнению

$$1^{\text{X}} - 1500\text{к}$$

$$\Phi_{\text{ж}} = \alpha_{\text{ж}} A_{\text{ж}} K_{\text{ж}} (t_{\text{ж}} - t_{\text{в}}), \quad (7.13)$$

где $\alpha_{\text{ж}}$ - коэффициент теплообмена конвекцией и излучением; $A_{\text{ж}}$ - площадь поверхности тела животного; $K_{\text{ж}}$ - коэффициент, учитывающий часть поверхности тела, участвующую в теплоотдаче, с учетом позы лежания животного на полу и складок тела; $t_{\text{ж}}$ - температура поверхности тела животного; $t_{\text{в}}$ - температура окружающей среды, например внутри помещения.

Для определения тепловой мощности свободной теплоты^х, выделяемой животными, пользуются упрощенной формулой

$$\Phi_{\text{ж}} = n q_{\text{ж}} K_t, \quad (7.14)$$

где n - число животных, $q_{\text{ж}}$ - тепловая мощность свободной теплоты, выделяемой одним животным; K_t - коэффициент, учитывающий изменение количества выделяемой теплоты животными в зависимости от температуры воздуха внутри помещения.

Температура $t_{\text{ж}}$ поверхности неодинакова на различных участках тела. Поэтому при расчетах по формуле (7.12) в качестве $t_{\text{ж}}$ следует принимать некоторую усредненную по поверхности температуру

$$t_{\text{ж}} = \frac{\sum_{i=1}^n A_{\text{ж}i} t_{\text{ж}i}}{A_{\text{ж}}}, \quad (7.15)$$

где $t_{\text{ж}i}$ - температура поверхности тела животного на i -м участке; $A_{\text{ж}i}$ - площадь i -го участка тела животного. Для нахождения $t_{\text{ж}}$ предварительно поверхность тела животного делят на n участков.

Для измерения температуры поверхности тела животного использовались низкотемпературные пирометры ПСИ-11 и ПСИ-14, [8], а также разработанные

^{х/} Общая теплота, выделяемая животными или птицей, складывается из свободной теплоты, отдаваемой в окружающую среду теплопроводностью, конвекцией и излучением, и скрытой теплоты, связанной с парами воды в испарениях с поверхности тела или в процессе дыхания.

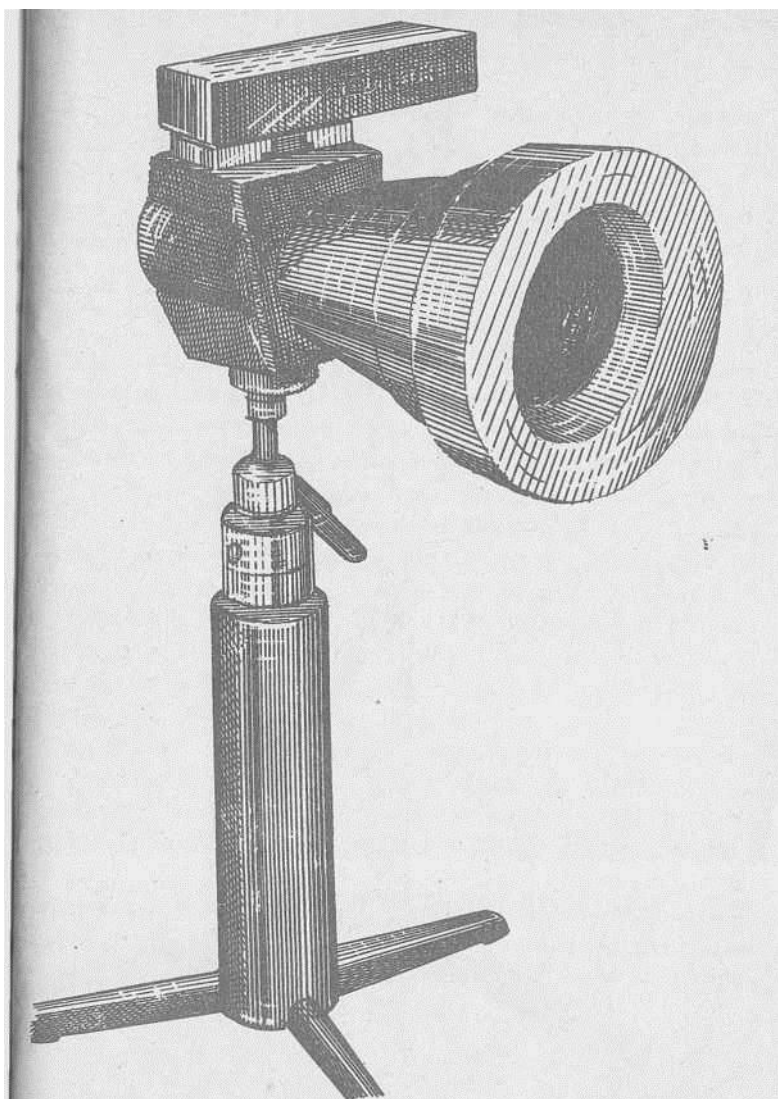


Рис. 7.11. Диафрагменный пирометр с коническим концентратом лучистой энергии

для этих целей на кафедре теплотехники Украинской сельскохозяйственной академии (рис. 7.11 и 7.12).

В соответствии с особенностями измерения температуры радиационными термометрами для определения 32-1500к

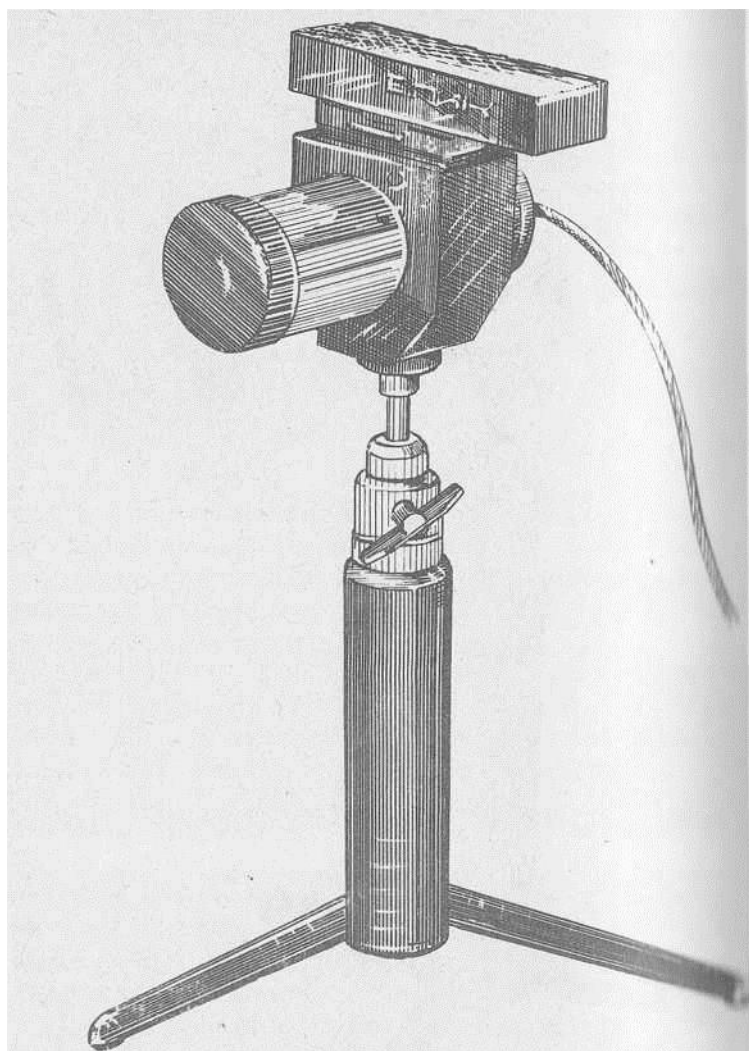


Рис. 7.12. Диафрагменный пирометр с цилиндрическим корпусом

истинной температуры излучаемой поверхности необходимо знать степень черноты последней. Пирометры ПСИ-11 и ПСИ-14 проградуированы по абсолютно черному телу, т.е. для $\epsilon = 1$. Поэтому истинную температуру вычислили по формуле

$$T_{\text{ж}} = \frac{T_{\text{рж}}}{\sqrt[4]{\epsilon_{\text{ж}}}}, \quad (7.16)$$

$T_{\text{рж}}$ — замеренная приборами температура (радиационная) поверхности тела; $\epsilon_{\text{ж}}$ — степень черноты поверхности слоя шерсти животного.

Количество тепла, теряемого животными в результате теплопроводности пола, определяют по уравнению

$$Q_{\text{п}} = \frac{\lambda}{\delta} A_{\text{н}} (t_{\text{нж}} - t_{\text{п}}), \quad (7.17)$$

где $Q_{\text{п}}$ — потери тепла через пол, Дж; λ — теплопроводность пола, Вт(м·К); $A_{\text{н}}$ — площадь контактной поверхности ног животного, м²; $t_{\text{нж}}$ — температура поверхности пола, контактирующей с конечностями, °С; $t_{\text{п}}$ — температура пола на некотором расстоянии δ (м) от поверхности контакта, °С.

Для определения $t_{\text{нж}}$ необходимо знать распределение поверхностных температур на теле животного. Так, например, в проводимых нами экспериментах на пороках при температуре воздуха ($t_{\text{в}}$) 21°С температура нижней части задних конечностей животных была на 2–3°С ниже, чем туловища.

Количество тепла, теряемого животными в результате излучения ($Q_{\text{л}}$), можно было бы вычислять по формуле Стефана–Больцмана. Однако из-за сложности определения используемого в ней коэффициента излучения поверхности тела животных, находящихся в помещениях, удобнее вести расчеты по более простой формуле, характеризующей теплообмен излучения между двумя телами, одно из которых не имеет вогнутой и расположено внутри второго

$$Q_{\text{л}} = C_0 A_{\text{ц}} \epsilon_{\text{пр}} \left[\left(\frac{T_{\text{ж}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{огр}}}{100} \right)^4 \right], \quad (7.18),$$

где C_0 — коэффициент излучения абсолютно черного тела; $T_{\text{ж}}$ — температура тела животного (определяется по формуле (7.15)), К; $T_{\text{огр}}$ — температура ограждающей поверхности, К; $A_{\text{ц}}$ — излучающая поверхность тела животного, определяемая по формуле $A_{\text{ц}} = k A_{\text{ж}}$ (k — коэффициент, зависящий от типа ограждающей поверхности, воспринимающей поток излучения от

животного, и от расположения ее по отношению к животному; в первом приближении можно принять его одинаковым для всех ограждающих конструкций и равным 0,8); $\epsilon_{пр}$ – приведенная степень черноты излучающей системы.

Этот параметр определяется по формуле

$$\epsilon_{пр} = 1 / \left[1/\epsilon_{ж} + (1/\epsilon_{огр} - 1) A_{ж}/A_{огр} \right], \quad (7.11)$$

где $A_{ж}$, $A_{огр}$ – площади поверхности тела животного и ограждающей поверхности, m^2 ; $\epsilon_{ж}$, $\epsilon_{огр}$ – степени черноты поверхности тела животного и ограждающей поверхности.

По данным, взятым из специальной литературы [40] и полученным экспериментально в соответствии с изложенной выше методикой для условий нахождения животных в термобарокамере КТВУ-8000/4, были рассчитаны и построены графики общих потерь тепла у телят разной массы в зависимости от температуры окружающего воздуха, которая изменялась от -20 до $+32^{\circ}C$ (рис. 7.13).

В обоих случаях наблюдается закономерность: животные с большой массой теряют больше тепла на единицу площади. Однако есть и различия. На графиках, построенных по полученным данным [40], потери тепла плавно убывают по мере увеличения температуры окружающего воздуха на всем рассматриваемом температурном отрезке. Кривые, полученные экспериментально, показывают, что минимуму теплопотерь соответствуют определенные значения температуры воздуха ($t_{б}$).

Значения $t_{б}$ хотя и близки для телят разной массы, но все же отметим, что для теленка меньшей массы минимуму теплопотерь соответствует более высокая температура.

Проанализировав экспериментальные кривые, можно сделать вывод о том, что при температурах окружающего воздуха, соответствующих минимуму теплопотерь на теплоотдачу в окружающее пространство животного затрачивается наименьшее количество энергии.

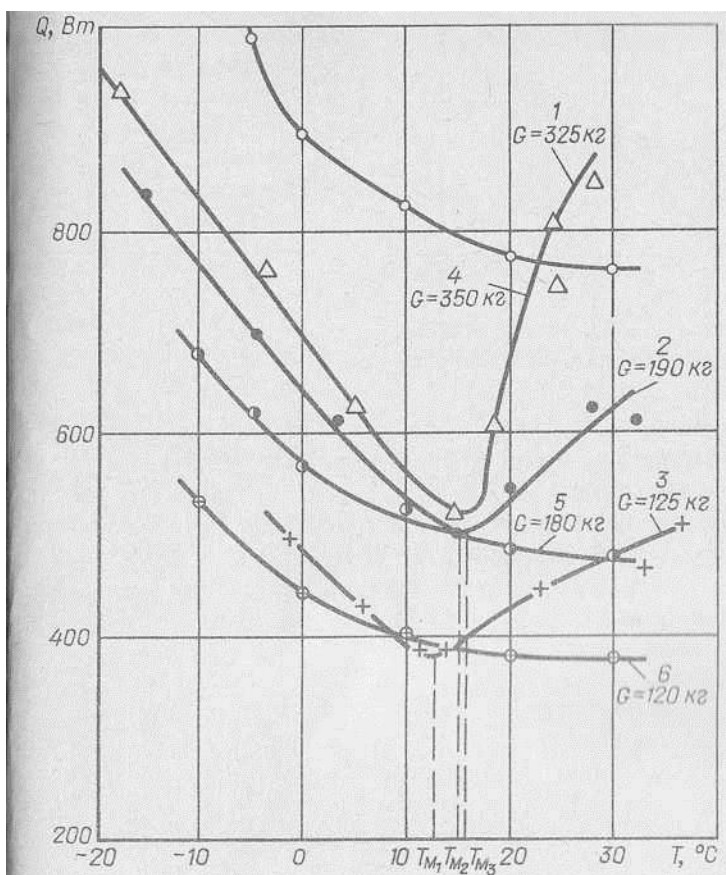


Рис. 7.13. Общие потери тепла $/Q_{0\delta}, \text{Вт}/$ у телят различной массы в зависимости от температуры воздуха в помещении $/t_{\text{в}}, \text{°C}/$:

1, 2, 3 - определены радиационным методом и рассчитанные по значениям поверхностных температур тела животного; 4, 5, 6 - рассчитанные по данным [40]

Аналогичные исследования мы проводили на двух находящихся на откорме свиньях массой 50 и 93 кг при температуре воздуха от 2 до 32°C и скорости движения воздуха $v_{\text{в}} = 0 \text{ м/с}$.

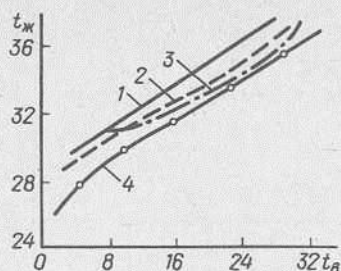


Рис. 7.14. Зависимость температуры поверхности тела свиней / $t_{ж}$, °C/ от температуры воздуха в помещении / $t_{в}$, °C/: 1 - по данным [69]; 2 - для свиньи массой 100 кг /по данным авторов/; 3 - по данным [38]; 4 - для свиньи массой 50 кг /по данным авторов/

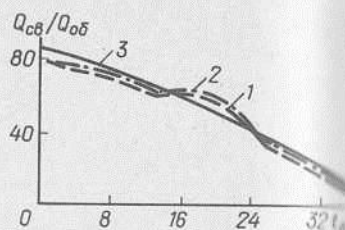
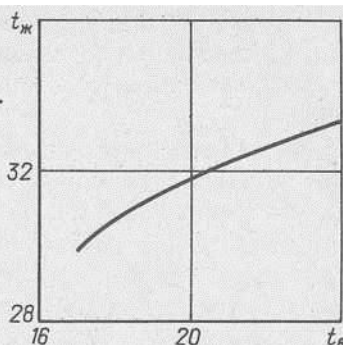


Рис. 7.15. Отношение свободной теплоотдачи к общей / $Q_{св}/Q_{об}$ / в зависимости от температуры окружающей среды: 1 - по данным [43]; 2 - по данным [41]; 3 - по данным авторов

Температуру поверхности тела одновременно измеряли бесконтактным способом (пирометром ПСИ-14) и контактнм (электротермометром ЗТП-М и универсальным цифровым вольтметром В7-27 А/1). Полученные показания совпали в пределах погрешностей приборов, что свидетельствует о корректности поставленных опытов. Изменения температуры поверхности тела свиней в зависимости от температуры окружающей среды и массы животного представлены на рис. 7.14. Эти результаты согласуются с данными, ранее указанными другими исследователями [38; 43; 69].

Полученные значения температур были использованы для определения свободной $Q_{св}$ и общей $Q_{об}$ теплоотдач тела животного по методике, изложенной в специальной литературе [17; 22]. На рис. 7.15 приведены графики зависимости отношения свободной теплоотдачи к общей от температуры окружающей среды, подтверждающей результаты других исследователей [41; 43].

рис. 7.16. Зависимость среднего значения температуры поверхности тела коровы / $t_{ж}$, °C/ от температуры окружающей среды / $t_{б}$, °C/



Исследования проводились непосредственно на животных. В соответствии с приведенной выше методикой на коже животного симметрично с левой и правой сторон тела мелом наметили 25 точек, в которых бесконтактным способом измеряли температуру. В результате получили данные о распределении температуры в 19 точках (учитывая однократный замер температуры носа животного).

На различных участках тела коровы наибольшая температура отмечалась на поверхности вымени, наименьшая — на конечностях. Разница между ними составляла более 5°C. Зависимость средней температуры поверхности тела от температуры окружающей среды показана на рис. 7.16.

Аналогичные замеры были выполнены в условиях Якутии, т.е. при низких температурах окружающей среды. Эти работы входили в комплекс исследований, направленных на акклиматизацию сельскохозяйственных животных к суровым климатическим условиям.

В резкоконтинентальном климате Якутии жизнедеятельность животных возможна лишь при их адаптации к таким условиям. В этом отношении совершенно замечателен опыт акклиматизации якутской лошади. В летнее время шерстяной покров этих животных мало отличается от покрова лошадей южных районов страны. Зимой их тела покрыты толстым слоем густой и длинной шерсти. Исследования по измерению температуры поверхности тела лошадей, а также яков и местной породы коров (якутско-холмогорской) производились

в естественных условиях в широком диапазоне температур окружающего воздуха. Для измерения температуры использовался низкопотенциальный пирометр ПСИ-11.

В связи с тем, что для пирометра ПСИ-11 рабочий диапазон температур окружающего воздуха находится в пределах $10...35^{\circ}\text{C}$, а термопограммы определялись и для отрицательных температур среды, был разработан термостат, обеспечивающий работу вторичного прибора при температурах вплоть до $t_{\text{H}} = -60^{\circ}\text{C}$.

Температура корпуса пирометра, т.е. первичного преобразователя температуры, существенно влияет на результат измерений. Это вызвало необходимость термостатировать телескоп первичного преобразователя. Для этого преобразователь помещался внутрь сосуда Дьюара, а последний, в свою очередь, надежно теплоизолировался от окружающего воздуха. Перечисленные мероприятия обеспечили независимость результатов замеров от влияния окружающей среды. Перед следующей серией измерений пирометр не менее получаса выдерживался при температуре 20°C . Таким образом при измерениях температура корпуса пирометра соответствовала техническим условиям эксплуатации.

При измерении истинной температуры пирометром степень черноты поверхности шерсти якутских животных была определена экспериментально по кусочкам кожи с шерстяным покровом и составила $\epsilon = 0,98$.

Результаты замеров представлены в графической форме. На рис. 7.17 изображено распределение температур по поверхности тела двух якутских лошадей в зависимости от температуры окружающего воздуха, изменявшейся в процессе экспериментов в диапазоне $-10...+21^{\circ}\text{C}$. Из графика видно, что температура поверхности тела якутских лошадей очень существенно зависит от температуры окружающего воздуха. Наибольшая температура наблюдалась на зеркале носа ($25,5...32,5^{\circ}\text{C}$) и в районе сердца, что соответствовало диапазону температур окружающего воздуха, указанному выше. Самая низкая температура тела лошади наблюдалась в районе живота и копыт животного. По мере возрастания температуры окружающего воздуха

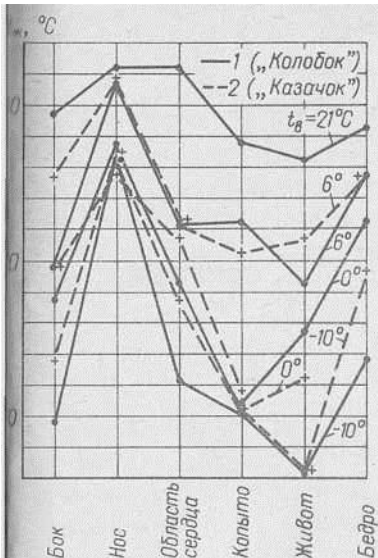


Рис. 7.17. Температура поверхности тела якутской лошади в зависимости от температуры окружающего воздуха:
1 - лошадь "Колобок",
2 - лошадь "Казачок".

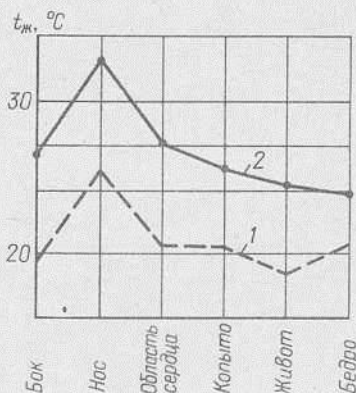


Рис. 7.18. Сопоставление температуры поверхности тела якутской лошади в состоянии покоя и после работы / $t_в = 5^\circ\text{C}$:
1 - покой, 2 - после работы

температуры различных участков тела якутских лошадей выравниваются. На рис. 7.18 приведены термограммы для якутской лошади в состоянии покоя и после работы.

Как и ожидалось, поверхностные температуры у якутских лошадей существенно понижаются с падением температуры окружающего воздуха. В наибольшей степени указанная закономерность наблюдается на участках, составляющих существенные по площади участки поверхности тела животных (бок, живот, бедро). Эти части тела имеют хороший шерстяной покров, в холодное время года уменьшающий потери теплоты в окружающую среду. Сравнительно слабо изменяется температура поверхности зеркала носа, поскольку это влияет

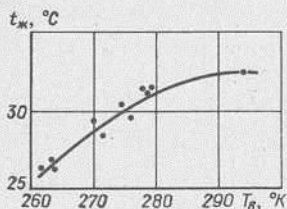


Рис. 7.19. Температура зеркала носа якутской лошади в зависимости от температуры окружающего воздуха

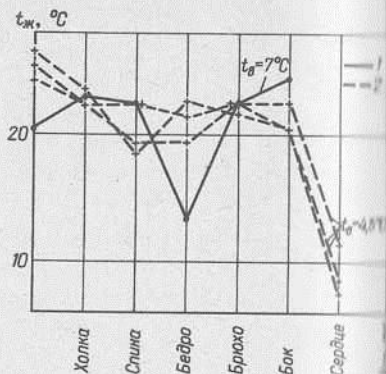


Рис. 7.20. Температура поверхности тела ячичи /1/ и коровы якутско-холмогорской помеси /2/ при температуре окружающего воздуха $t_b = 4,5^\circ\text{C}$

на дыхательные функции организма животного. Потери теплоты здесь мала (рис. 7.19). На рис. 7.20 приведены термограммы для самки яка и коров якутско-холмогорских помесей при $t_{окр} = 4,5^\circ\text{C}$. При этом у коров наблюдалась меньшая разница поверхностных температур для различных участков тела по сравнению с якутскими лошадьми, что можно объяснить меньшей толщиной шерстяного покрова.

Температурное состояние яков близко к температурному состоянию коров, отличаясь более низкими температурами на холке и в районе живота, где наблюдается мощный шерстяной покров.

Полученные термограммы позволяют определить реальные условия содержания животных при различных параметрах окружающей среды и тем самым найти оптимальные условия содержания животных.

7.4. Приборы для теплотрического контроля предпосевого облучения семян элаковых растений и картофеля

7.4.1. Характеристика приборов

При светотермообработке продуктов сельскохозяйственного производства важно получить информацию об уровне тепловых потоков во времени и пространстве. Такая информация необходима для организации контроля, управления и автоматизации процесса облучения.

Для определения теплового потока при облучении семян перед посевом необходимы автономные, малогабаритные приборы, основанные на радиационном методе измерений. Такие приборы в силу своих достоинств – малой инерционности и габаритности, автономности – удобны для измерения поверхностной плотности теплового потока облучаемых семян на предназначенных для этой цели установках по тестовой программе. При их помощи можно оптимизировать качество облучения семян и повысить культуру эксплуатации установок.

Отраслевым конструкторско-технологическим бюро Института проблем материаловедения АН Украины созданы установки для предпосевной светотермической обработки семян (СГУ-6) и картофеля (Исток-1).

Теплотрическая аппаратура для контроля режимов работы и измерения плотности тепловых установок разработана в Украинской сельскохозяйственной академии.

Радиометр РСП-100 предназначен для измерения лучистых потоков плотностью до $q = 100 \text{ кВт/м}^2$ (рис. 7.21). Приемник теплового излучения (датчик) расположен в торцевой части термостабилизатора 2, который служит для поддержания постоянной температуры "холодных" спаев термопар датчика. В качестве приемника теплового излучения использована медьконстантановая термобатарея, разработанная Институтом технической теплофизики АН Украины. Плотность упаковки батареи – до 2000 термопар на 1 см^2 [8]. Слоистая серийная батарея размерами $17 \times 17 \times 1 \text{ мм}$ имеет

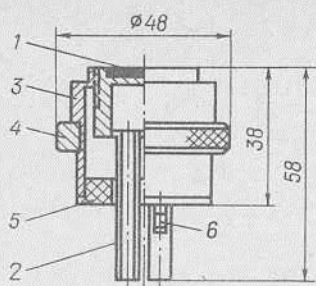


Рис. 7.21. Радиометр суммарного поглощения РСП-100; 1 - приемник теплового излучения; 2 - термостабилизатор; 3 - корпус; 4 - гайка; 5 - крышка; 6 - контактная группа

чувствительность около $7 \cdot 10^{-3}$ В/Вт. Зональные колебания чувствительности не превышают 10 %.

Термостабилизатор представляет собой медный цилиндр, с тыльной стороны которого впаяны патрубки для подключения термостата. К цилиндру термостабилизатора с помощью резьбы крепится корпус 3, который фиксируется крышкой 5. На крышке закреплена система контактов 6, предназначенных для коммутации радиометра с милливольтметром. Гайка 4 служит для крепления корпуса прибора на гелиотехнической установке СГУ-6.

Радиометр РСП-600 служит для измерения лучистых потоков плотностью до $q = 600$ кВт/м². В этом приборе (рис. 7.22) для защиты датчика от теплового излучения применен тепловой шунт, в качестве которого использована полая медная крышка 2 с впаянными в нее патрубками. Такая крышка позволяет осуществить дополнительное охлаждение термостабилизатора.

Техническими характеристиками радиометров являются чувствительность и рабочий коэффициент прибора.

Интегральная чувствительность S_E , мВ/Вт, равна отношению электрического напряжения на выходе к мощности излучения на входе. В качестве единицы чувствительности выбирают отношение электрического сигнала на выходе к плотности потока излучения, падающего на приемную площадку. Единица измерения чувствительности радиометра - мВ/Вт·м².

Для определения рабочего коэффициента K_p , Вт/м радиометра РСП-100 использована формула

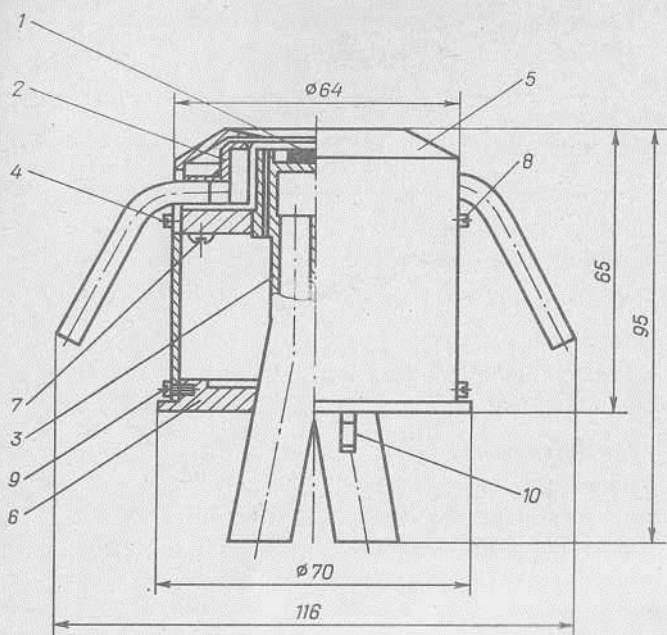


Рис. 7.22. Радиометр суммарного поглощения РСР-600: 1 - приемник теплового излучения; 2 - тепловой шунт; 3 - термостабилизатор; 4 - шайба фиксирующая; 5 - кожух; 6 - крышка; 7-9-винты; 10 - контактная группа

$$K_P = K_3 / \left[m \cdot n \cdot \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (E_3/E)_{ij} \right] \right], \quad (7.20)$$

где K_3 - рабочий коэффициент эталонного радиометра ($K_3 = 24 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{мВ}$); E_3 - ЭДС, вырабатываемая эталонным прибором в тех же условиях облучения, мВ; n - число уравнений тепловой нагрузки; m - число измерений на каждом уровне.

Рабочий коэффициент радиометра РСР-600 определяется по известным значениям плотности теплового потока q и выходного сигнала E

$$K_P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{q}{E} \right)_i. \quad (7.21)$$

Значения рабочих коэффициентов радиометров даны в табл. 7.4.

7.4. Технические характеристики приборов РСП-100 и РСП-600

Технические характеристики	Значение	
	РСП-100	РСП-600
1. Предел измерения плотности теплового потока, кВт/м ²	0,7	0,1...600
2. Основная допустимая погрешность измерения, %	5,0	3,0
3. Дополнительная погрешность, вызываемая отклонением температуры термостабилизации от градуируемой, %	3,0	0,5
4. Инерционность (не более), с	2,0	2,0
5. Постоянная времени, с	10	20
6. Рабочий коэффициент, кВт/м ² мВ	0,953	60
7. Электрическое сопротивление приемника теплового излучения при температуре 20°C (не более), Ом	120	156
8. Диаметр приемной площадки, мм	20	26
9. Габаритные размеры, мм	48x58	95x116
10. Масса, кг	0,15	0,45

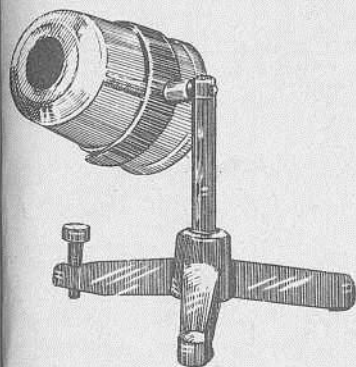


Рис. 7.23. Общий вид радиометра РСР-100

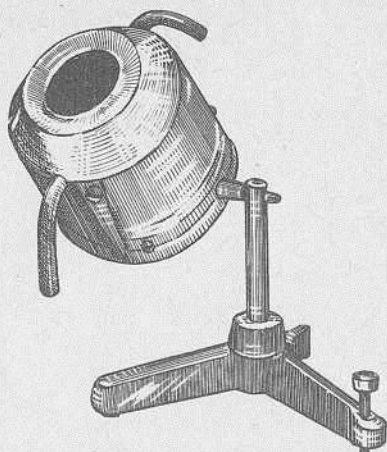


Рис. 7.24. Общий вид радиометра РСР-600

Вырабатываемый термопарами электрический сигнал зависит от температуры окружающего воздуха и, следовательно, температуры несущей части прибора. Поэтому для обеспечения требуемой степени точности измерений в радиометре РСР-100 применена температурная компенсация, осуществляемая с помощью воздухоохлаждаемого термостабилизатора, включенного в цепь ультратермостата.

Прибор РСР-600 предъявляет меньшее требование к термостабилизации, но тем не менее нуждается в принудительном охлаждении проточной водой.

Приборы являются первичными датчиками сигнала, который может быть измерен с помощью стандартного автономного вольтметра с разрешающей способностью не ниже 100 мкВ/деление.

Время измерения выходного сигнала стрелочным прибором — 4 с, цифровым — 2 с. Определение поверхностной плотности теплового потока производится по тарировочному (градуировочному) графику в зависимости от электрического сигнала прибора или умножением на его рабочий коэффициент.

Определение полярности измеряемой термоЭДС вторичным прибором осуществляется вручную.

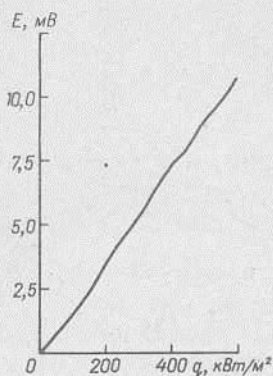


Рис. 7.25. Градуировочный график радиометра РСП-100

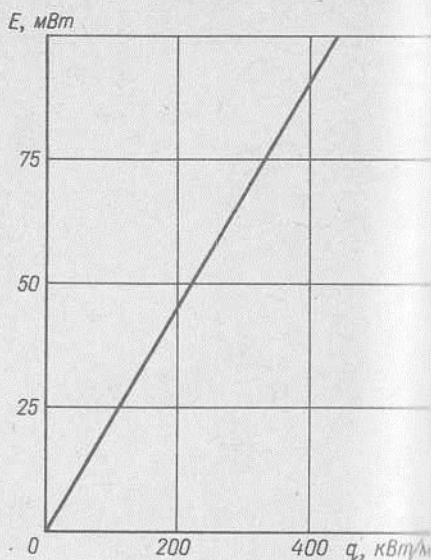


Рис. 7.26. Градуировочный график радиометра РСП-600

Общий вид радиометров приведен на рис. 7.23 и 7.24. Их градуировочные графики даны на рис. 7.25 и 7.26. Диапазон измерения, пределы допускаемой погрешности и другие характеристики приборов указаны в таблице.

7.4.2. Измерение плотности лучистого потока установки "Исток-1"

Установка "Исток-1", разработанная в Институте проблем материаловедения АН Украины, предназначена для предпосевной обработки картофеля. Она состоит из роликового транспортера, над которым равномерно по всей его длине установлены облучатели (рис. 7.27). В качестве источника оптического излучения использованы дуговые ксеноновые лампы мощностью 10 кВт. Клубни, перемещаясь по транспортеру, подвергаются светотермической обработке лучистым потоком ламп. Интенсивность облучения картофеля р

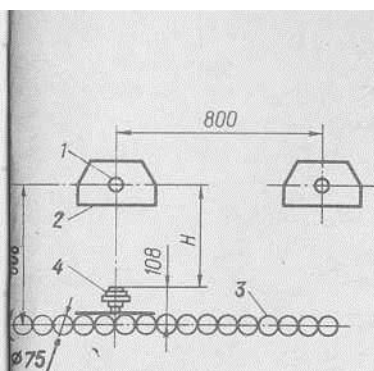


Рис. 7.27. Схема расположения облучателей и радиометра при измерениях плотности лучистого потока установки "Исток-1":

- 1 - источник излучения; 2 - кожух-отражатель облучателя;
- 3 - ролики транспортера;
- 4 - радиометр РСП-100

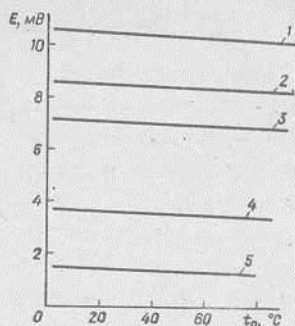


Рис. 7.28. График зависимости выходного сигнала радиометра РСП-100 от температуры термостабилизации при значении q , Вт/м²:
 1/ 9000; 2/ 7920;
 3/ 6600; 4/ 3600;
 5/ 1440

регулируется изменением скорости движения транспортера или расстояния облучателя до клубней.

Для определения плотности лучистого потока использовался радиометр РСП-100. Измерения проводились под каждым облучателем при их различной высоте над клубнями. Расстояние H от источника излучения до торца прибора изменялось от 300 до 500 мм.

Результаты измерений обработаны в виде зависимостей плотности лучистого потока под каждым облучателем установки от высоты их подвеса над облучаемой поверхностью (рис. 7.28). Приведенные графики указывают на то, что установка "Исток-1" не обеспечивает равномерное облучение клубней. Полученные данные позволяют управлять процессом светотермической обработки клубней и, следовательно, оптимизировать режим облучения.

7.4.3. Исследование гелиоустановки СГУ-6

Гелиоустановка СГУ-6 предназначена для предпосев-ного облучения семян злаковых растений.

Основным элементом установки является параболической формы зеркальный фацетный концентратор солнечной энергии (рис. 7.29). Установка оснащена системой автоматического слежения за Солнцем. Изменение положения в пространстве главной оптической оси концентратора достигается вращением установки вокруг азимутной и угловой осей. Установка развивает мощность облучения 600...650 кВт/м².

Измерение плотности теплового потока в фокальной плоскости кВт/м² производилось радиометром РСР-60 который крепился на координатном устройстве с помощью кронштейна.

Значения q_{Φ} определялись при различной интенсивности солнечной радиации Φ . Величина q_{Φ} находилась из зависимости

$$q_{\Phi} = K_{\rho} E,$$

где K_{ρ} - рабочий коэффициент радиометра РСР-600

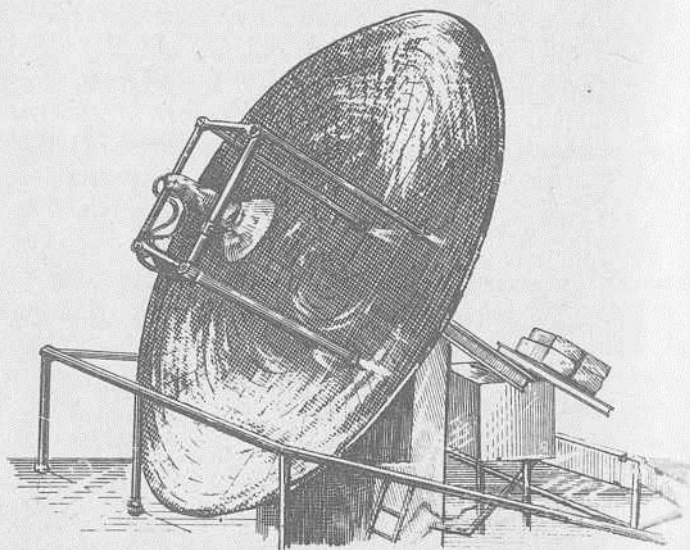


Рис. 7.29. Общий вид гелиоустановки СГУ-6.

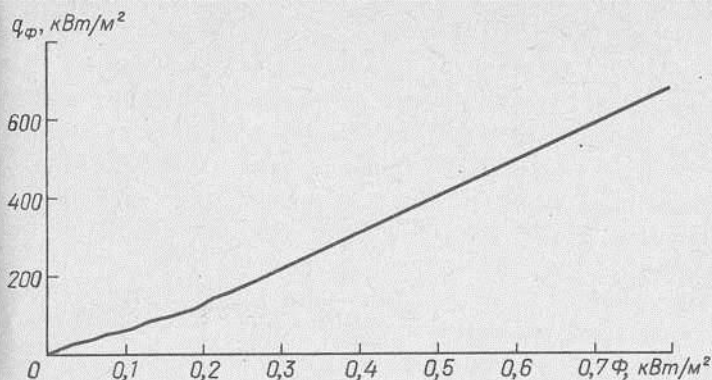


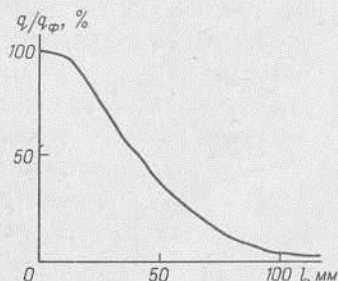
Рис. 7.30. Зависимость поверхностей плотности теплового потока в фекальной плоскости СГУ-6 от интенсивности солнечной радиации.

($K_p = 60 \text{ кВт/м}^2$); \mathcal{E} – выходной сигнал прибора. Зависимость плотности теплового потока в фокальной плоскости от интенсивности солнечной радиации ($q_\phi = f(\phi)$) приведена на рис. 7.30.

Интенсивность свето-термического воздействия на семена зависит от расстояния l облучаемой поверхности от фокуса. Значения плотности теплового потока q в процентах от величины q_ϕ при различных расстояниях l показаны на рис. 7.31.

Внедрение в сельскохозяйственное производство приборов РСП-100 и РСП-600 позволит регулировать режим облучения в соответствии с биоэнергетическими требованиями процесса. Это приводит также к экономии трудовых и энергетических ресурсов при предпосевной обработке посевного материала.

Рис. 7.31. Распределение поверхностной плотности теплового потока вдоль главной оптической оси СГУ-6



7.5. Теплометрия при обработке корма

В последнее время получили развитие работы по обогащению корма белком с помощью добавок продуктов микробиологического синтеза. Такими продуктами чаще всего являются зерно и солома, обработанные с помощью микроорганизмов в процессе твердофазной ферментации (ТФФ). При этом содержание протеина в корме повышается с 3...4 до 8...14 %.

Исследованиями, проведенными в Институте микробиологии и вирусологии АН Украины, установлено, что температура ферментации для мезофилов должна быть в пределах 28...30°C. Необходимо обеспечить интенсивное вентилирование камер, где происходит процесс ТФФ. Рекомендуемая продолжительность ферментации 100 ч. Выращивание грибов осуществляется в слое 30...40 мм.

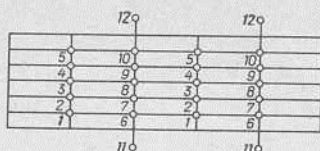
В процессе твердофазной ферментации в результате биологических процессов, протекающих в корме, имеет место выделение физиологической теплоты. Интенсивность тепловыделения изменяется во времени. Вследствие этого изменяется во времени и поле температур. Повышение температуры свыше допустимой приводит к перегреву производственной культуры, подавлению вегетативного развития гриба, снижению его способности к образованию ферментов. Для поддержания оптимальной температуры, при которой тепловая обработка протекает наиболее эффективно, поверхность корма обдувается воздухом. Поддержание требуемого значения температуры в процессе ферментации для тонких слоев корма не представляет трудностей.

В производственных условиях, когда выход продукции должен быть значительным, толщина слоя δ_c корма должна быть увеличена до $\delta_c = 100$ мм.

С целью выявления оптимальных условий ферментации при $\delta_c = 100$ мм определены поля температур, значения тепловых потоков в процессе биотепловой обработки корма. Длительность процесса – 120 ч.

Было установлено 12 датчиков температур. При этом каждый датчик дублировался с тем, чтобы иметь информацию как в среднем, так и в крайних сечениях слоя корма (рис. 7.32).

рис. 7.32. Схема установки датчиков температуры



Графики изменения температур в слое корма на одном из исследуемых режимов приведены на рис. 7.33. Номера на графиках соответствуют номерам датчиков в слое корма. Датчики 11 и 12 регистрировали температуру среды соответственно под и над кормом.

Величина теплового потока измерялась контактным тепломмером конструкции ИТТФ АН Украины. Закономерность изменения удельного теплового потока q_v Вт/м³, в процессе ТФФ приведена на рис. 7.34.

Из этого графика следует, что активное тепловыделение наблюдается примерно через 40 ч после начала процесса ТФФ и продолжает расти последующие 12...46 ч. Максимальное значение мощности тепловыделения $q_v = 2400$ Вт/м³ имеет место через 80...84 ч с начала процесса. При этом температура ферментации в среднем во всем слое равна 38...40°C. Дальнейшее повышение температуры приводит к заметному уменьшению интенсивности тепловыделения.

Приведенные данные указывают на то, что при $\delta_c = 100$ мм вентиляция слоя корма сверху и снизу недостаточна. Поэтому разработана система дополнительного охлаждения корма. При этой системе через каждые 50 мм слоя устанавливается плоский трубчатый теплообменник, обдуваемый холодным воздухом. Теплообменник изготовлен из тонкостенного материала, коррозионностойкого в среде корма.

Организацию процесса охлаждения рекомендуется проводить следующим образом.

Система охлаждения внутренних слоев корма с $\delta_c = 100$ мм включается в работу на 12-м часе процесса ТФФ. До этого момента воздух подается в камеру ферментации только в количестве, достаточ-

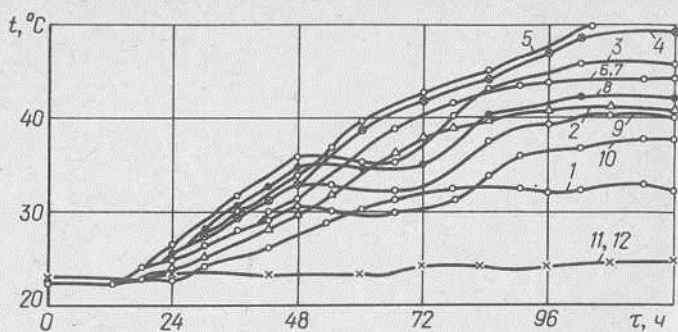


Рис. 7.33. Графики изменения температуры t в слое корма толщиной 100 мм

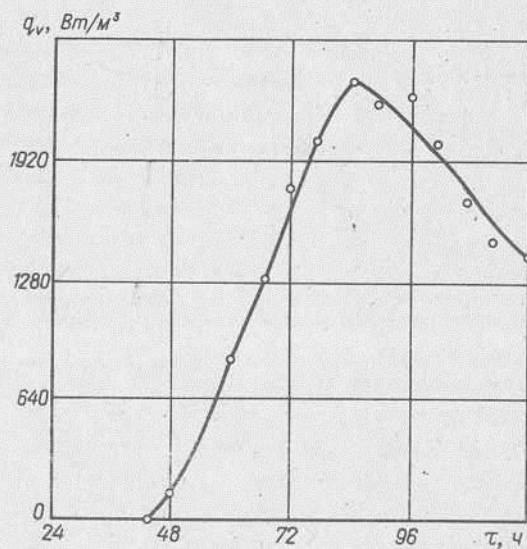


Рис. 7.34. График изменения плотности теплового потока, излучаемого слоем корма в процессе ферментации во времени

ном для обеспечения нормальной жизнедеятельности грибов.

Количество воздуха, подаваемого для охлаждения, меняется каждые 12 ч процесса, а именно: 48...60, 60...72, 72...84, 84...96, 96...108, 108...120 часов.

Интенсивность тепловыделения соответственно равна: $q_{V_1} = 400$; $q_{V_2} = 1280$; $q_{V_3} = 2080$; $q_{V_4} = 2320$; $q_{V_5} = 2020$; $q_{V_6} = 1630$ Вт/м³.

Для регулирования количества подаваемого воздуха на охлаждение корма следует следить за датчиками температуры. Температура процесса ТФФ не должна превышать 30...36°C.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. А д и у т о р и Е. Ф. Новые методы в теплоснабжении. - М.: Мир, 1977. - 228 с.
2. А н а т ы ч у к Л. И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справ. - К.: Наук. думка, 1979. - 766 с.
3. А н т о н о в П. П. Микроклимат в помещении для скота // Механизация и электрификация совхозов. - 1981. - № 4. - С. 15-18.
4. Шаровой радиометр / А.А. Белоконь, Г.Я. Бубель, Н.И. Профатилова, Д.М. Щербина // Приборы и техника эксперимента. - 1976. - № 5. - С. 81-83.
5. Б о г о с л о в с к и й В. Н. Строительная теплофизика. - М.: Высш. шк., 1982. - 415 с.
6. В а с и л ь е в Б. В. Малогабаритный автономный низкотемпературный пирометр немодулированного излучения // Оптико-механ. пром-сть. - 1983. - № 3. - С. 23-25.
7. В о в к С. Н. Математический эксперимент и научное познание. - К.: Выща шк., 1984. - 196 с.
8. Г е р а щ е н к о О. А. Основы теплотехники. - К.: Наук. думка, 1971. - 192 с.
9. Автоматизированный комплекс для методологического обеспечения рабочих средств измерений плотности потоков теплового излучения / О.А. Герашенко, Н.Н. Базырь, В.Н. Морозов, С.А. Сажина // Измерительная техника. - 1985. - № 12. - С. 31-32.
10. Г е р а щ е н к о О. А., Г р и щ е н к о Т. С а ж и н а С. А. Радиационная градуировка батарейных датчиков теплового потока // Теплофизика и теплотехника. - К., 1976. - Вып. 32. - С. 15-17.
- 11-12. Новые приборы для исследования лучистого теплообмена / О.А. Герашенко, В.Г. Карпенко, Ф.Л. Зовский и др. // Лучистый теплообмен. - Краснодар. - 1974. - Вып. 1. - С. 107-116.
13. Приборы для измерения теплового излучения биологических объектов / О.А. Герашенко, С.А. Са-

- кина, В.Г. Карпенко и др. // Тепловые приемники излучения. - Л., 1980. - С. 64-66.
14. Герашенко О. А., Федоров В. Г. Тепловые и температурные измерения: Справ. руководство. - К.: Наук. думка, 1965. - 304 с.
15. Герашенко О. А., Федоров В. Г. Техника теплотехнического эксперимента. - К.: Наук. думка, 1964. - 164 с.
16. Гервазюк М. М., Демидко М. Д. Колгоспно-радгоспні плодосвоочереробні підприємства. - К.: Урожай, 1972. - 216 с.
17. Драганов Б. Х., Есин В. В., Вуев В. П. Применение теплоты в сельском хозяйстве: Учеб. пособие. - 2-е изд., перераб. и доп. - К.: Вьща шк., 1990. - 319 с.
18. Драганов Б. Х., Левенкова К. А. Нестационарная теплопередача через ограждение теплицы с энергосберегающим экраном / Укр. с.-х. акад. - К., 1990. - 7 с.
19. Драганов Б. Х., Савина Л. В. Определение теплоотдачи тела животных в зависимости от температуры окружающей среды // Висн. с.-г. науки. - 1987. - № 4. - С. 62-64.
20. Использование контактной и бесконтактной теплотерии в животноводстве / Б.Х. Драганов, Ю.В. Сергиенко, Л.В. Савина и др. // Междунар. агропром. журн. - 1989. - № 2. - С. 160-165.
21. Драганов Б. Х., Черных Л. Ф., Ферт А. Р. Методика расчета теплового режима наружных ограждающих конструкций сельскохозяйственных зданий. - К.: Изд-во УСХА, 1991. - 128 с.
22. Егизаров А. Г. Отопление и вентиляция зданий и сооружений сельскохозяйственных комплексов. - М.: Стройиздат, 1981. - 239 с.
23. Жадан В. З. Теплофизические основы хранения сочного растительного сырья на пищевых предприятиях. - М.: Пищ. пром-сть, 1976. - 240 с.
24. Ишанин Г. Г. Приемники излучения оптических и оптико-электронных приборов. - Л.: Машиностроение, 1986. - 215 с.

25. К о з ы р е в Б. П. Широкоугольный ИФК радиометр для контактных измерений поверхностных температур // Изв. ЛЭТИ. - Л., 1967. - Вып. 66. С. 42-44.

26. К о з ы р е в Б. П., Т у ч к о в В. Н. Высокочувствительный радиометр для биологических объектов // Изв. ЛКТИ. - Л., 1970. - Вып. 94. - С. 10-12.

27. К о з ы р е в Б. П., П а р а м о н о в А. И. ИФК термоэлектрический радиометр ИКТЭРЛ и его применение // Там же. - С. 13-14.

28. К о л е с н и к А. А. Факторы длительного хранения плодов и овощей. - М.: Госторгиздат, 1959. - 355 с.

29. К о н д р а т ь е в К. Я. Актинометрия. - Л.: Гидрометеиздат, 1965. - 691 с.

30. К р и к с у н о в Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники. - М.: Сов. радио, 1978. - 297 с.

31. К у р е ц В. К., П о п о в Э. Г. Моделирование продуктивности и холодоустойчивости растений. - Л.: Наука, 1979. - 156 с.

32. Л и н е в е г Ф. Измерение температур в технике: Справ. - М.: Металлургия, 1980. - 544 с.

33. Л о п а т и н а Г. Г. Оптические печи. - М.: Металлургия, 1969. - 215 с.

34. Л ы к о в А. В. Теория сушки. - М.: Энергия, 1968. - 472 с.

35. Л ы к о в А. В. Теория теплопроводности. М.: Высш. шк., 1967. - 544 с.

36. Л ы к о в А. В. Тепломассообмен: Справ. 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергия, 1978. - 480 с.

37. М а з у л е н к о А. Г., Ф е д о р о в В. Г. Замораживание пищевых продуктов в блоках. - М.: Агропромиздат, 1988. - 208 с.

38. Методические рекомендации по расчету теплопотребления для обеспечения микроклимата животноводческих помещений // Центр. науч.-исслед. и проект. технол. ин-т механизации и электрификации животноводства. - Запорожье, 1979. - 26 с.

39. Методы определения теплопроводности и температуропроводности / Под ред. А.В. Лыкова. - М.: Энергия, 1973. - 336 с.
40. ОНТП 1-77. Общесоюзные нормы технологического проектирования предприятий крупного рогатого скота. - М.: Колос, 1979. - 80 с.
41. ОНТП-77. Общесоюзные нормы технологического проектирования свиноводческих предприятий. - М.: Колос, 1978. - 55 с.
42. Метрологическая аттестация теплотеметрических приемников излучения / В.А. Орлов, Н.И. Профатилова, С.А. Сажина и др. // Пром. теплотехника. - 1980. - № 1. - С. 94-97.
43. Осовцев В. А., Штокман Е. А. Теплоотдача откормочных свиней // Механизация и электрификация соц. сел. хоз-ва. - 1977. - № 1. - С. 19-20.
44. Полевой В. И. Анализ погрешности образцового преобразователя типа ШРК // Пром. теплотехника. - 1982. - № 4. - С. 24-31.
45. Попов В. Д. Основы теории тепло- и массообмена при кристаллизации сахарозы. - М.: Пищ. пром-сть, 1973. - 320 с.
46. Разработка основ теплотеметрии и ее приложений к определению свойств веществ, энергетических эффектов, измерению физических параметров. Гос. рег. № 72008159 / Ин-т техн. теплофизики АН УССР. - К., 1975. - 128 с.
47. Рысс А. А., Гурвич Л. И. Автоматическое управление температурным режимом в теплицах. - М.: Агропромиздат, 1986. - 127 с.
48. Сажина С. А. Современное состояние теплотеметрии лучистых потоков // Современные экспериментальные методы исследования процессов тепло- и массообмена: Материалы Междунар. школы-семинара. - Минск, 1981. - Ч. 1. - С. 22-34.
49. Сажина С. А. Тонкопленочные теплотеметрические устройства для измерения лучистой энергии // Космические исследования на Украине. - К.: Наук. думка, 1978. - С. 80-82.

50. Сергиенко Ю. М., Перетятко В. И., Ружицкий В. Б. Термическое сопротивление наружных стен помещений для скота / Укр. с.-х. акад. - К., 1987. - 8 с. - Деп. в ВНИИО 12.04.88, № 8695.

51. Инфракрасное излучение поверхности тела якухой лошади в осенний период / Ю.М. Сергиенко, М.К. Слепшов, И.П. Гурьев и др. // Адаптация человека и животных: Материалы Всесоюз. симпозиума "Биологические проблемы Севера" / Якутс. фил. СО АН СССР. - Якутск, 1986. - Вып. 5. - С. 95-96.

52. Сивков А. А., Гуд В. В. Пневматический приемник лучистой энергии с тензометрическим датчиком // Приборы и техника эксперимента. - 1967. - № 1. - С. 195-196.

53. Сидорук С. Оптимизация микроклимата в овчарнях // Тр. науч.-теор. конф. сов. и польс. молученых. - К.: Будивельник, 1984. - С. 242-244.

54. Скрипников Ю. Г. Прогрессивная технология хранения и переработки плодов и овощей. М.: Агропромиздат, 1989. - 159 с.

55. СНиП П-3-79^{хх}. Строительная теплотехника Госстрой СССР. - М., 1986. - 32 с.

56. Состояние и тенденции развития переносных пиromетров излучения // ЦНИИТЭИприборостроения. М., 1988. - Вып. 2. - 36 с.

57. Справочник по приемникам оптического излучения / Под ред. Л.З. Криксунова и Л.Г. Кременчугской. К.: Техника, 1985. - 216 с.

58. Теория и техника теплофизического эксперимента / Под ред. В.К. Шукина. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 360 с.

59. Тепловые трубы / Пер с англ. и нем. под ред. Э.Э. Шпильрайна. - М.: Мир, 1972. - 420 с.

60. Федоров В. Г., Пахомов В. Н., Мазуренко А. Г. Теплотеметрический метод определения теплопроводности лабильных и агрессивных материалов // Теплофизика и теплотехника. - К. 1979. - Вып. 36. - С. 27-30.

61. Теплофизические измерения и приборы / Под ред. Е.С. Платунова. - Л.: Машиностроение, 1986. - 256 с.
62. Теплофизические характеристики слоя риса-зерна в зависимости от влажности и температуры / В.А. Резчиков, В.Ф. Корчинский, А.Г. Мазуренко, В.Н. Пахомов // Хранение и переработка зерна. - М., 1979. - Вып. 4. - С. 20-24.
63. Точность контактных методов измерения температуры / А.Н. Гордон, Я.В. Малков, Н.Н. Эргардт, Н.А. Ярышев. - М.: Изд-во стандартов, 1976. - 232 с.
64. Федоров В. Г. Основы тепломассометрии. - К.: Выща шк., 1987. - 184 с.
65. Федоров Г. В. Теплометрия в пищевой промышленности. - М.: Пищ. пром-сть, 1974. - 174 с.
66. Чи ж о в Г. Б. Теплофизические процессы в холодильной технологии пищевых продуктов. - М.: Пищ. пром-сть, 1979. - 272 с.
67. Приемники инфракрасного излучения / Ж. Шаль, М. Марфан, М. Мюнш и др. - М.: Мир, 1969. - 269 с.
68. Шарль П. де Бришамо. Солнечное излучение и радиационный теплообмен в атмосфере. - М.: Мир, 1966. - 319 с.
69. Шкеле А. Э. Некоторые вопросы математического моделирования теплообмена животных // Науч. тр. Челябин. ин-та механизации и электрификации сел. хоз-ва. - Челябинск, 1982. - С. 36-42.
70. Шмидт-Нильсен К. Как работает организм животного. - М.: Мир, 1976. - 142 с.
71. В i r k y M. M. Calorimeter for laser energy measurements // Appl. Optics. - 1971. - 1, v. 19. - P. 132-135.
72. G r y s a K. Metody okreslanja Liczby Biota i wspotczynnika przejmowania ciepota // Mechanika Teoretyczna i Stosowana. - 1982. - 20. - S. 71-86.
73. K l e m s I. H., B a r t o l o m e o D. Large-area, high sensitivity heat flow sensor // Rev. Sci. Instrum. - 1982. - 53(10). - P. 1609-1612.

74. L e v y F. L. Meat-towards better understading of the mechanism of weight loss // Annexe, 1973 an Bulletin de L'IIF. - P. 103-113.

75. L u d w i c k i M. Pomiary i automatyzacja proces'ow w przemyśle spożywym. - Lodz: Politechnika Lodzka, 1989. - 357 s.

76. O l e s k o w i c z - P o p i e l C z., B o g u s l a w s k i L. Czujniki strumieni ciepła. - Poznan: Politechnika Poznanska, 1986. - 56 s.

77. S i m o n i c h I. C., N o f f a t R. Y. New technique for mapping heat transfer coefficient contours // Rev. Sci. Instrum. - 1982. - 53(5). - P. 678-683.

78. S t i l m a n n C. Infrared radiometer for the 1969 mariner mission to Mars // Appl. optics. - 1969. - 3, v. 8. - P. 639-64.

79. W i s n i e w s k i S. Wymiana ciepła. - Warszawa: PWN, 1988. - 364 s.

80. W i t t e A., H a r p e r E. Experimental investigation of heat transfer in rochet thrust chamber // AIAA journal. - 1963. - 2, v. 1. - P. 443-451.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТЕПЛОМЕТРИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ	5
1.1. Плотность потоков теплоты в про- цессах сельскохозяйственного произ- водства	5
1.2. Производные тепломассообменные характеристики	16
1.3. Использование тепломассообменных характеристик при описании тепло- вых процессов методами теории по- добия	22
2. МЕТОДЫ КОНТАКТНОЙ ТЕПЛОМЕТРИИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ	27
2.1. Энтальпийные методы	27
2.2. Электротепловой метод	36
2.3. Градиентные методы	42
2.4. Метод вспомогательной стенки	46
2.5. Использование метода вспомога- тельной стенки для измерения перепада температур	54
2.6. Измерение локальных тепловых пото- ков и их компонентов	59
2.7. Технология изготовления и расчет тепломеров	67
2.8. Конструктивные разработки тепло- меров	74
3. МЕТОДЫ БЕСКОНТАКТНОЙ ТЕПЛОМЕТ- РИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРО- ЦЕССОВ	77
3.1. Классификация приемников теплового излучения и их краткая характерис- тика	77
3.2. Основы измерения потоков теплового излучения	100

3.3.	Методы измерения. Схемы приборов	103
3.4.	Элементная база приемников теплового излучения	108
3.5.	Устройство теплотрических приемников теплового излучения	113
3.6.	Интерферометрия. Голография	123
4.	ТЕПЛОМЕТРИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ И ПРОДУКТОВ	127
4.1.	Метод циклов для комплексного определения ТФХ	127
4.2.	Определение ТФХ в квазистационарном и нестационарном режимах	133
4.3.	Блочный принцип ТФХ-приборов	138
4.4.	Установки для исследования твердых, жидких и пастообразных объектов и продуктов	140
4.5.	Установки для определения ТФХ зерновых продуктов	145
4.6.	Теплотрические оболочки и калориметры	148
4.7.	Методы и установки определения испарительной способности	151
5.	МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОМЕТРИИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ	158
5.1.	Источники погрешностей в измерении тепловых потоков и их компонентов	158
5.2.	Градуировка тепломеров	160
5.3.	Определение зависимости чувствительности базовых элементов от температуры и способы ее снижения	165
5.4.	Метрологическое обеспечение ТФХ-приборов	169
5.5.	Минимизация погрешности в определении ТФХ сельскохозяйственных объектов и продуктов	174
5.6.	Метрологическое обеспечение приемников теплового излучения	177

6.	ТЕПЛОМЕТРИЯ ОБРАБОТКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРОДУКТОВ	192
6.1.	Охлаждение зерна в псевдоожженном слое после уборки урожая	192
6.2.	Теплоотдача к механически перемещаемому слою зернистого материала	196
6.3.	Теплообмен при продувке, фонтанировании и пневмотранспортировании зерновых продуктов	200
6.4.	Теплофизические характеристики сельскохозяйственных продуктов	209
7.	ТЕПЛОМЕТРИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ	213
7.1.	Теплометрия ограждающих конструкций сельскохозяйственных производственных помещений	213
7.2.	Теплометрия сельскохозяйственных энергетических установок	228
7.2.1.	Основные сведения	228
7.2.2.	Конструкция и основные характеристики пирометра	230
7.2.3.	Экспериментальные исследования характеристик пирометра	235
7.2.4.	Основные технические данные пирометра	241
7.3.	Теплометрия биологических объектов	242
7.3.1.	Общие сведения	242
7.3.2.	Теплоотдача тела животных	242
7.4.	Приборы для теплотрического контроля предпосевного облучения семян злаковых растений и картофеля	255
7.4.1.	Характеристика приборов	255
7.4.2.	Измерение плотности лучистого потока установки "Исток-1"	260
7.4.3.	Исследование теплоустановки СТУ-6	262
7.5.	Теплометрия при обработке корма	264

Наукове видання

ДРАГАНОВ Борис Харлампієвич,
САЖИНА Світлана Олексіївна,
СЕРГІЄНКО Юрій Михайлович,
ФЕДОРОВ Володимир Гаврилович

ТЕПЛОМЕТРІЯ
У СІЛЬСЬКОМУ
ГОСПОДАРСТВІ

Здано на складання 10,09,92. Підписано до друку
01.02.93. Формат 84x108/32. Папір друк. № 2.
Друк офсетний. Умови, друк. арк. 14,7. Обл.вид. арк.
15,54. Замовлення 1500к.

Видавництво Української сільськогосподарської акаде-
мії, 252032, Київ, вул. Сахаранського, 111а.

ВПП корпорації УкрІТТ, 252171, Київ, вул. Горького,
180.