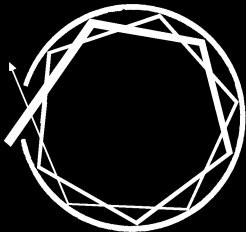


О.А.ГЕРАЩЕНКО, В.Г.ФЕДОРОВ



Техника

**ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА**

В книге описаны основные приемы и методы тепловых измерений в теплотехнических экспериментах.

Большое внимание уделено новым приборам для измерения локальных значений тепловых потоков, в частности, датчикам теплового потока, разработанным авторами.

Книга рассчитана на научных и инженерно-технических работников в области теплотехники и автоматики, а также может быть рекомендована для аспирантов и студентов этих специальностей.

Ответственный редактор
канд. техн. наук Г. Ф. СЕЛЯВИН

Печатается по постановлению ученого совета
Института технической теплофизики Академии наук Украинской ССР

Олег Аркадьевич Герашенко,
Владимир Гаврилович Федоров
Техника теплотехнического эксперимента

Редактор И. К. Ситник
Художественный редактор И. П. Антолюк
Оформление художника С. И. Бродского

Технический редактор М. А. Рекек

Корректор Ц. Ц. Шулак

БФ 05233 Зак. № 708 Изд. № 200 Тираж 250 Формат бумаги 60×90^{1/16} Печ. физ.
листов 10,25 Условн. печ. листов 10,25 Подписано к печати
30 III 1964 г. Цена 61 коп.

Львовская типография № 14 Государственного комитета Совета Министров УССР
по печати, Львов, Стефаника 11

ПРЕДИСЛОВИЕ

В процессе непрерывного развития техники возникают все новые и новые ее отрасли. В них большое место занимают процессы теплообмена. Поэтому необходимо изучать их с целью интенсификации или, реже, ограничения. Современная теория теплообмена нуждается в тщательных экспериментальных исследованиях, так как почти во всех своих отраслях носит эмпирический или полуэмпирический характер.

Каким бы способом не происходил теплообмен между двумя телами или частями одного тела — теплопроводностью, конвекцией или тепловым излучением, основными величинами, характеризующими теплообмен в любой точке тела (локальный теплообмен), являются температура и тепловой поток.

Температурные измерения в теплотехническом эксперименте характеризуют качественную сторону явления, тепловые — количественную. Для измерения температуры создано много приборов, большинство из них доведено до серийного изготовления. Имеется и многочисленная литература по термометрии.

Что же касается тепловых измерений, то до сих пор еще почти нет приборов, которые позволяли бы измерять количество тепла, проходящего через достаточные малые участки теплообменной поверхности в любой точке тел различной конфигурации. В каждом отдельном случае экспериментатор создает особую методику измерения тепловых потоков, идя зачастую на усложнение и искажение условий опыта. Результатом же является обычно усредненное по большой поверхности (части аппарата или аппарату в целом) измерение теплового потока. При этом можно пройти мимо важных обстоятельств эксперимента. Поэтому большого внимания заслуживают работы по созданию и исследованию приборов для измерения локальных тепловых потоков. Эти приборы необходимы как в научном эксперименте, так и при эксплуатации и наладке различного теплотехнического и химического оборудования, в системах авто-

матического регулирования и управления технологическими процессами, связанными с теплообменом. Особые требования к локализации тепловых измерений предъявляются в аппаратах и установках новой техники с предельно форсированным теплообменом, в частности в ядерных реакторах на быстрых и промежуточных нейтронах, в ракетных двигателях в оптических квантовых генераторах, в электронике больших мощностей и т. д.

В предлагаемой книге делается попытка классифицировать методы тепловых измерений, рассматриваются возможности локализации измерений этими методами, описываются приборы для тепловых измерений. Основная часть книги посвящена исследованиям авторов по разработке, практическому применению и внедрению датчиков теплового потока — приборов, в известной мере восполняющих пробел в технике теплотехнического эксперимента.

При создании этих приборов авторы стремились добиться высокой локализации и универсальности измерений, точности и стабильности, отсутствия искажений физической картины процесса.

ГЛАВА I

ВИДЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Все предпосылки, выводы и заключения этой книги основываются на представлении о тепловой энергии как о субстанции однородной и непрерывной. Основное необходимое нам свойство тепла состоит в том, что тепло, в соответствии со вторым началом, передается под воздействием температурного напора от тела с более высокой температурой к телу с более низкой. Формы передачи тепловой энергии могут быть самыми разнообразными. Практическое значение имеют следующие три формы передачи тепловой энергии: тепловое излучение, теплопроводность, конвекция.

1. ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Тепловое излучение — это один из видов передачи энергии посредством электромагнитных волн. Вследствие вероятностного характера распределения энергии в форме колебательных движений элементов атомов и молекул в твердых телах их излучение оказывается самым разнообразным по частоте. Спектр их излучения непрерывен по длине волны.

В металлах в связи с большим количеством свободных электронов, движение которых носит характер неорганизованных торможений и ускорений, на описанное выше излучение накладывается импульсное электромагнитное излучение также со сплошным спектром различных длин волн.

Особое положение в отношении излучения занимают газы вследствие их способности к дискретному излучению и поглощению. В дальнейшем, говоря о теплообмене излучением, мы будем иметь в виду в основном теплообмен между твердыми телами с непрерывным спектром излучения.

Одна из основных особенностей твердых тел заключается в том, что их воспринимающая способность определяется качеством и состоянием поверхности. Непрозрачное тело поглощает лишь часть падающей на него энергии, остальная часть энергии отражается.

Тело с поверхностью, поглощающей всю падающую на нее энергию излучения, называется абсолютно черным. Практически таких тел не существует. Даже такие «черные тела», как сажа и черный бархат, отражают до 5% падающей на них энергии.

Доля энергии, поглощенная поверхностью тела, называется степенью черноты (ϵ). Величина, дополняющая степень черноты до единицы, называется степенью отражения.

Для того чтобы наиболее коротко систематизировать данные наблюдений и прийти к эффективному обобщению, надо иметь представление об оболочках, идеально отражающих и идеально поглощающих, т. е. о так называемых степени черноты и отражения которых равны единице. В создании модели абсолютно черного тела практически можно достичь сравнительно многого, приблизив степень черноты к единице. Что же касается совершенных отражателей, то степень поглощения около 2—3% является тем пределом, достичь которого удается далеко не каждому экспериментатору. Такую степень поглощения можно получить лишь на чрезвычайно тщательно полированных золотых, медных и серебряных зеркалах, способных долгое время сохранять качество поверхности только в вакууме и без загрязнений.

Представим себе, что два излучающих тела помещены в идеально отражающую изоляцию таким образом, что обмен энергией возможен только за счет лучеспускания и только между этими двумя телами. Степень черноты этих тел положим существенно различной. Какими бы ни были начальные температуры тел, со временем, вследствие теплообмена в соответствии со вторым началом термодинамики, тела придут в температурное равновесие, т. е. их температуры станут равными и неизменными во времени. Рассматриваемые тела можно разделить абсолютно черной перегородкой, которая, придя в состояние температурного равновесия, ничем не изменит условий обмена энергией между этими двумя телами.

Таким образом, при температурном равновесии каждое из тел будет отдавать в окружающее пространство столько же лучистой энергии, сколько отдавало бы абсолютно черное тело. Такое излучение назовем полным. Часть полного излучения тела, равную его степени отражения, тело отразит из того количества энергии, которое пришло к нему из окружающего пространства. Остальная же часть представит собой собственное излучение, которое дополняет энергетический поток за счет

отражения до величины полного излучения. Следовательно, тело, находящееся в температурном равновесии, будет излучать само тем больше, чем меньше оно отражает, т. е. чем больше оно поглощает.

Правило это впервые было сформулировано П. Прево (1809) и в дальнейшем (1859) более строго сформулировано Кирхгофом в следующем виде: отношение испускательной способности тела к его поглощательной способности для всех тел при одинаковой температуре постоянно.

При радиационном нагревании тело поглощает тем больше, чем больше его степень черноты, радиационное охлаждение характеризуется обратной зависимостью. Изложенное может быть проиллюстрировано следующими опытами.

Внесем в несветящееся водородное пламя черепок фарфора, расписанного простым темным рисунком на белом фоне. При накаливании рисунок начинает светиться более ярко, чем фон. Если же внести черепок внутрь закрытой полости с небольшим отверстием для наблюдения и довести его до состояния температурного равновесия со стенками печи, то рисунок перестает быть различимым. При нагревании черепка радиационным излучателем, например описанной ниже радиационной печью, и охлаждении за счет свободной или вынужденной конвекции светлые места остаются светлыми, темные — темными.

Аналогичную картину можно наблюдать при прокаливании электрическим током платиновой ленты, до половины покрытой платиновой чернью. Черная часть светится ярче, чем блестящая.

На основании изложенного можно сделать вывод о том, что замкнутая полость, находящаяся в состоянии температурного равновесия, при любой степени черноты, отличной от идеальной нулевой, в смысле излучения будет вести себя так, как если бы ее стенки были абсолютно черными. Если в такой замкнутой полости проделать относительно малое отверстие, то излучение через него, будет соответствовать излучению абсолютно черного тела. На основании закона Кирхгофа полость с таким отверстием и поглощать будет как абсолютно черное тело. Для того чтобы эффективность полости была высокой, диаметр отверстия должен быть мал по сравнению с поперечником полости (порядка $1/10$). Большие относительные отверстия можно допустить в тех случаях, когда стенки, противоположные отверстию, достаточно черны, как, например, в радиационной печи, описанной в гл. III. На рис. 1 показан ход лучей в модели абсолютно черного тела.

Количество энергии, излучаемой телом, определяется на основании закона Стефана—Больцмана. В 1884 г. Л. Больцман, на основании законов термодинамики, а также опытных и теоретических изысканий И. Стефана (1879), пришел к выводу, что

суммарное излучение абсолютно черного тела должно быть пропорционально четвертой степени температуры, т. е.

$$E_T = \sigma T^4. \quad (1.1)$$

Приведенное уравнение носит наименование закона Стефана—Больцмана

Тщательные экспериментальные измерения дали значение постоянной

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ вт/м}^2 \cdot \text{град}^4. \quad (1.2)$$

Обычные материалы, применяемые в технике, по степени черноты отличаются от абсолютно черного тела

Теоретические соображения Л. Больцмана не распространяются на не абсолютно черные, или, как принято называть, серые тела. Экспериментальные данные также не подтверждают закон Стефана—Больцмана для серых тел. Так, для латины при температуре около 1000°C и для вольфрама опытные данные хорошо аппроксимируются зависимостями:

$$\sigma_{Pl} = 3,56 \cdot 10^{-11} T^{4,77}, \quad (1.3)$$

$$\sigma_{W} = 5,9 \cdot 10^{-13} T^{5,35}. \quad (1.4)$$

Такие зависимости крайне неудобны для инженерной практики, поэтому для серых тел принята следующая зависимость

$$E_{cT} = \epsilon \sigma T^4. \quad (1.5)$$

Таким образом, для серых тел в технике условно принято, что закон Стефана—Больцмана соблюдается. Поправку на отклонения всех видов относят к степени черноты ϵ , которая в результате этого становится еще и функцией температуры. Если такая зависимость установлена экспериментально, то с точки зрения строгости инженерных расчетов все обстоит благополучно.

Другие законы излучения в целях сокращения объема опущены.

2. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

Под теплопроводностью принято передачу тепла внутри тела от одной части к другой или от одного тела к тесно соприкасающемуся с ним другому без заметных смещений частей тел.

По второму закону термодинамики такая передача тепла должна происходить в сторону убывания температуры. Следовательно интересующая нас область (или области) должна представлять собой температурное поле. Напомним, что температура — величина скалярная.

В общем случае задача теплопроводности в однородном изотропном сплошном теле без источников и стоков энергии описывается уравнением Фурье, имеющим в декартовых координатах следующий вид

$$\frac{\partial T}{\partial z} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right). \quad (1.6)$$

При установившемся во времени процессе левая часть уравнения становится равной нулю и уравнение преобразуется в уравнение Лапласа:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0. \quad (1.7)$$

В большинстве случаев приходится иметь дело именно с такими установившимися во времени процессами. Лишь при оценке инерционности чувствительных элементов приборов, когда нельзя будет пренебречь собственной теплоемкостью материала датчиков, мы обратимся к анализу нестационарных во времени процессов, например к определению момента времени, когда теплоемкость датчика перестает влиять на его показания.

Анализируя скалярное температурное поле, мы приходим к полю векторному — полю градиента температур. Температурным градиентом называется вектор, имеющий направление наиболее быстрого увеличения температуры и равный по величине производной температуры по координате в направлении наиболее быстрого изменения. Таким образом, градиент представляет собой скорость изменения температуры при переходе по линии наиболее быстрого ее изменения.

Из математической физики известно, что поля, описываемые уравнением Лапласа (1.7) являются потенциальными, а сама функция температуры — потенциалом. Именно в связи с этим приобретает особый смысл понятие о температурном потенциале, как о величине, характеризующей температурное поле, и открывается возможность аналогии, имеющих большое практическое значение. В этом смысле потенциальное поле является идеально автомодельным; температурный потенциал без нарушения строгости постановки и решения задачи можно заменить потенциалом электрическим (электротепловая аналогия), магнитным, гидравлическим и др.

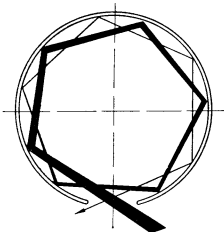


Рис 1 Схема движения луча в модели абсолютно черного тела

Если какое-либо явление аналогично с каждым из ряда явлений, то все явления аналогичны между собой. По аналогии с другими полями для температурного также существует понятие напряженности поля, равной отрицательному градиенту:

$$t = -\text{grad } T \quad (1.8)$$

В теле с заданными теплофизическими свойствами напряженность температурного поля характеризует условия, способствующие перетеканию тепла, т. е. возникновению тепловых токов. Вектор теплового потока по направлению совпадает с вектором напряженности. Это утверждение может быть легко доказано. Действительно, если бы векторы потока и напряженности не совпадали, то вектор потока, как всякую векторную величину, можно было бы разложить на две взаимно-перпендикулярные составляющие, одна из которых совпала бы с напряженностью, а вторая — была направлена перпендикулярно к ней, т. е. вдоль изотермической поверхности. В соответствии со вторым началом термодинамики эта вторая составляющая должна быть равна нулю.

Функция, значения которой остаются постоянными на линиях тока, называется функцией тока. Разность ее значений в двух точках пропорциональна количеству тепла, протекающему в единицу времени через пространство между этими точками в слое с фиксированной толщиной, следовательно, густота линий теплового тока пропорциональна плотности потока.

Итак, удельный тепловой поток пропорционален температурной напряженности:

$$q = \lambda t = -\lambda \text{ grad } T \quad (1.9)$$

Для различных веществ коэффициент пропорциональности λ различен. Он характеризует теплофизические свойства тела и называется коэффициентом теплопроводности.

Линии равного потенциала — эквипотенциалы и линии тока образуют ортогональную систему. Из анализа двумерного уравнения Лапласа в конечных разностях следует, что соотношения между сторонами прямоугольников, образуемых эквипотенциалами и линиями тока, выбранными с одинаковым шагом, сохраняется постоянным на всем исследуемом поле. Отсюда следует, что если в одной точке поля требуется, чтобы линии равного потенциала и линии тока при достаточной густоте образовывали квадратную сетку, то такое условие конформности, т. е. в данном случае квадратности ячеек сетки, должно сохраняться на всем поле. При решении двумерных задач это обстоятельство позволяет, с одной стороны, не производя вычислений, построить довольно точную картину температурных полей при заданных граничных условиях, с другой, — эффек-

тивно контролировать результаты модельных и численных расчетов. Заметное отклонение ячеек сетки от конформности говорит не только о наличии ошибки, но и о месте, где она допущена.

Из уравнения (1.9) следует, что для определения теплового потока достаточно знать теплопроводность материала и температурную напряженность в нужном месте определяемого теплового потока. Однако в большинстве практических задач мы с достаточной точностью не знаем ни теплопроводности, ни температурной напряженности.

В связи с этим в практике получил довольно широкое распространение так называемый принцип дополнительной стенки, который состоит в том, что в исследуемую область вносится дополнительная стенка с известными теплофизическими свойствами, снабженная устройством для измерения температурной напряженности. Тепловое сопротивление такой стенки должно быть незначительным, чтобы она не вносила дополнительных температурных возмущений.

На принципе дополнительной стенки построено много приборов для измерений тепловых потоков, в частности, широко известные «пояс Шмидта». Некоторые приборы описаны ниже.

3. КОНВЕКЦИЯ

Конвекция — это теплопередача посредством переноса. К ней относятся многие разновидности теплопередачи. Еще в 1874 г. основоположник многих направлений развития гидродинамики и теплопередачи Осборн Рейнольдс писал о преобладающем значении скорости воздуха в теплопередаче в паровозных котлах. Он указывал на основную роль движения и перемешивания частиц.

Наиболее яркие виды теплопередачи переносом — кипение и конденсация. В обоих случаях выделение или поглощение энергии происходит в непосредственной близости к теплообменной поверхности. Переданная через поверхность энергия в случае, например, кипения сразу же расходуется на превращение жидкости в пар. В дальнейшем переданная энергия транспортируется путем чисто механического переноса. Именно в связи с тем, что потребление и превращение энергии происходит близко от поверхности обмена, интенсивность процесса теплообмена необычайно высока.

Особое место занимает так называемая свободная конвекция, в которой движение сред обусловлено самой теплоотдачей.

Явления конвективного обмена крайне сложны. Лишь в простейшем случае ламинарной свободной конвекции можно по-

лучить сколько-нибудь достоверные результаты. В большинстве остальных случаев не удается даже сформулировать предмет анализа. Физические представления об отдельных этапах развития процесса крайне скудны.

Трудности в исследовании процессов конвективного обмена связаны с отсутствием элементарного оперативного инструмента, который позволил бы проникнуть в суть изучаемых явлений. Так, например, до последнего времени широко распространена концепция, предложенная Прандтлем, согласно которой следует различать задачи внутреннюю и внешнюю.

Типичный пример внешней задачи — обтекание свободно летящих тел, например снаряда, самолета, ракеты и т. п. Начиная от передней критической точки, вследствие проявления сил вязкости, на поверхности тела вдоль по течению развивается пограничный слой. При не слишком больших разрежениях среда налипает на поверхность; сила взаимодействия поверхности со средой определяется давлением и касательным напряжением. То и другое может быть только положительным. В соответствии с законом сохранения импульса, импульс касательных напряжений должен компенсироваться количеством движения среды, входящей в пограничный слой, который, таким образом, должен непрерывно питаться количеством движения, а значит, и материей, за счет набегающего потока.

Вначале силы вязкости в тонком пограничном слое преобладают над силами инерции, движение в слое носит спокойный характер, соседние слои не перемешиваются друг с другом. Такой режим называется ламинарным.

При нарастании толщины пограничного слоя движение приобретает неустойчивый характер; малейшее возмущение начинает получать питание энергии извне за счет энергии движения среды. Появляются пульсационные составляющие скорости движения, причем пульсации возникают во всех направлениях.

Режим такого течения, так же как и пограничный слой, называется турбулентным. При этом, однако, в непосредственной близости к обтекаемой стенке сохраняются условия для устойчивого движения. Такая своеобразная ламинарная подстилка называется ламинарным подслоем. Ламинарный подслоем относительно тонок.

Появление поперечных по отношению к основному движению пульсаций способствует значительному увеличению интенсивности обмена энергией (кинетической и тепловой) между омываемой стенкой и омывающей средой.

Примером внутренней задачи может служить течение в трубе достаточной длины. Если поток совершенно не подготовлен до входные кромки трубы будут находиться в условиях задачи внешней. По мере продвижения потока в трубу слои на проти-

воположных стенках, все более утолщаясь, наконец сомкнутся. Дальнейшее преодоление потоком касательных напряжений на стенках происходит за счет продольного градиента давления, без которого в условиях внутренней задачи движение немыслимо.

В начальном участке, где слои еще не сомкнулись, для движения также необходим градиент давления, так как происходит перестроение потока с ускорением центральных частей. Для гидродинамической стабилизации: потока в условиях внутренней задачи длина трубы должна быть примерно в 50 раз больше ее диаметра. Согласно имеющимся сведениям, после гидродинамической подготовки тепловая стабилизация наступает сравнительно быстро (на участке, равном 10—15 диаметрам). Если теплообмен происходит по всей длине трубы, включая участок гидродинамической стабилизации, то тепловая стабилизация наступает одновременно с гидродинамической.

При малых числах Рейнольдса пограничные слои на противоположных стенках остаются ламинарными вплоть до их смыкания. При этом дальнейшее движение среды по трубе будет также ламинарным. Случаи такие, хотя и редки в технических условиях, но возможны. При ламинарном течении могут существенно различаться размеры теплового и гидродинамического пограничного слоев. Определяющим при этом является отношение коэффициента кинематической вязкости к коэффициенту температуропроводности, называемое критерием Прандтля

$$Pr = \frac{\nu}{a}. \quad (110)$$

Если вязкость преобладает над температуропроводностью ($Pr > 1$), гидродинамический ламинарный слой растет скорее теплового, что происходит при течении обычных технических жидкостей (масла, вода, горючие).

Для одноатомных газов число Прандтля близко к единице, а для двухатомных — равно ей. Тепловой и динамический слои либо полностью эквивалентны, либо отличаются друг от друга несущественно.

Для жидких металлических теплоносителей критерий Прандтля намного ниже единицы — тепловой слой преобладает над динамическим.

Все изложенное относится к ламинарным течениям без поперечных пульсаций. При развитом турбулентном течении каждая конкретная среда, находящаяся в пульсационном движении, наложенном на основное, в общем равномерное, движение, в такой же мере переносит содержащийся в ней импульс, как и содержащееся тепло. Таким образом, турбулентный аналог критерия Прандтля в точности равен единице.

Главное требование ко всем тепловым измерениям — это минимальное искажение физической картины изучаемого явления. При исследовании локальных тепловых потоков достигнуть этого трудно, но возможно

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОГО ТЕПЛООБМЕНА

4. КОНВЕКЦИЯ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

Исследовать локальный теплообмен — это значит определить величину и направление теплового потока на участке теплообменной поверхности. Размеры участка при этом гораздо меньше характерного размера исследуемого тела.

В решении задач по распространению тепла внутри твердого тела теплопроводностью (истинной или эффективной), конечной целью является обычно нахождение поля температур, а в задачах по теплообмену между твердым телом и жидкостью (или газом) — определение коэффициента теплоотдачи. В обоих случаях решения должны быть подчинены главной цели всех теплотехнических расчетов и задач — получению сведений о количестве передаваемой тепловой энергии, т. е. о тепловом потоке.

Однако вышеприведенные решения составляют лишь часть этой задачи. Для получения поля теплового потока по температурному полю необходимы сведения об изотропности материала, коэффициенте теплопроводности и его зависимости от температуры, пористости, влажности и т. п. Коэффициент теплоотдачи, являющийся мерой пропорциональности между тепловым потоком и разностью температур твердое тело — жидкость, зависит от большого числа факторов (условий движения жидкости, конфигурации тела и т. п.), в том числе и от самой разности температур. Наличие температурного фактора, проявляющегося при больших температурах и скоростях движущейся среды [34, 115], ставит под сомнение удобство пользования коэффициентом теплоотдачи α . Имеет смысл, по-видимому, перейти к определению непосредственно тепловых потоков q как в экспериментальных, так и в теоретических работах. К аналогичному выводу пришли Е. В. Кудряшев, К. Н. Чакалев и Н. В. Шумаков [52] при исследовании особенностей нестационарных тепловых процессов.

Определение поля тепловых потоков в твердом теле аналитическими методами возможно лишь в отдельных случаях, обычно для тел простой формы (пластина, цилиндр, шар) при известных граничных условиях [60]. Определение самих гранич-

После смыкания турбулентных пограничных слоев в трубе в центральной части движется турбулентное ядро, в пристеночной области располагается тонкий ламинарный подслои.

Физическая картина явления, достаточно сложная и в рассмотренных кратко простейших случаях, существенно осложняется в случае несоответствия закона передачи от стенки к потоку импульса и тепла. Строго говоря, все изложенное выше относится к случаю, когда закон передачи тепла полностью совпадает с характером передачи импульса. В технических задачах импульс передается от тела, имеющего по отношению к потоку определенный потенциал импульса. Для передачи тепла это соответствует определенному температурному потенциалу, т. е. постоянству температуры вдоль всей поверхности тела во внешней задаче или вдоль трубы — во внутренней. Однако обычно температура тела или трубы не постоянна по ходу потока, что в большинстве случаев обусловлено теплообменом с обтекающей средой.

Для соответствия между характерами развития теплового и динамического взаимодействия потока со стенками при не изотермической поверхности необходимо, чтобы потенциал импульса стенки относительно потока изменялся так же, как температура. При этом относительные скорости различных частей тела или трубы должны быть разными, а это приводит к потере физического смысла задачи.

Прандтль и его последователи создали стройную теорию, подтверждаемую многочисленными экспериментами. Тем не менее, в последнее время появились сообщения о чрезвычайно тонких измерениях, согласно которым ламинарного подслоя не существует.

Это значит, что либо наши рассуждения содержат какой-то дефект, либо достоверность полученных экспериментальных результатов сомнительна. Даже если эти новые результаты справедливы, мы пока что должны придерживаться старой системы, так как новой, как таковой, еще не существует.

В свете изложенного становится ясной бесперспективность большинства исследований местного теплообмена при помощи маломерных калориметров. Как правило, исследователи совершенно не беспокоятся о том, чтобы соседние с калориметром участки на исследуемой модели обогрелись (или охладились) так же, как исследуемый. В большинстве случаев теплообмен на соседних участках совершенно не организуется [53]. При этом тепловая, а значит, в какой-то мере и гидродинамическая «история потока» при подходе к измерительному калориметру оказывается существенно искаженной. Обмен теплом вблизи калориметра происходит значительно интенсивнее, что в дальнейшем, как правило, компенсируется поправочными коэффициентами.

ных условий, т. е. значений тепловых потоков и температуры в местах соприкосновения исследуемого тела с окружающей средой, аналитически является задачей, которую можно решить также только для одной из форм движения жидкости относительно тела — плоского обтекания при ламинарном пограничном слое [97]. В некоторых других случаях местные значения тепловых потоков определяют полумпирическими методами. Так, Г. Н. Кружилин и В. А. Шваб [51], решив уравнение теплопроводности для полого цилиндра, по температуре его внешней поверхности судили о тепловых потоках и коэффициенте теплоотдачи. Довольно широко распространены методы определения тепловых потоков по изменению температуры во времени для нестационарного режима.

Большинство же задач требует экспериментального определения тепловых потоков

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ПО КОЛИЧЕСТВУ ПАРА

Методы исследования теплообмена, основанные на определении количества энергии по количеству испарившейся или сконденсировавшейся жидкости, распространены довольно широко. Преимущества этого метода обусловлены физическим свойством жидкостей сохранять изобаричность при изотермичности и наоборот. Благодаря этому, обеспечивая сравнительно простыми методами постоянство давления, удается получить постоянство температуры. Последнее в свою очередь позволяет легко осуществлять разделительные перегородки с нулевым тепловым потоком, т. е. изоляторы, близкие к идеальным.

При исследовании теплоотдачи от поверхности необходима организация нормированного подвода энергии, что обеспечивается при конденсации пара. Приведем распространенный способ измерения среднего теплового потока по длине трубы. Обогреваемый участок трубы заключается в два концентрических металлических кожуха, один внутри другого. Внешний и внутренний кожухи питаются слегка перегретым паром с одинаковым давлением. В связи с равенством давлений стенки внутреннего кожуха не пропускают тепла. Во внутреннем кожухе единственным потребителем энергии является исследуемая труба, конденсат с которой отводится индивидуально и подвергается измерению. По количеству сконденсировавшегося пара при известных параметрах можно достаточно точно судить о количестве переданной энергии.

Небольшой (несколько градусов) перегрев делается для того, чтобы исключить возможность попадания в кожухи влажного пара, что может привести к ошибкам, более существенным, чем те, которые возникают за счет перегрева. Здесь же

необходимо обратить внимание на исключение возможности нагрева переохлажденного конденсата паром во внешнем кожухе

Естественно, что в такой установке могут быть потери через различные конструктивные элементы. Такие потери учитываются «нулевыми» тарифными установками.

Нуннер [127] использовал описанную схему при исследовании теплопередачи к воздуху внутри длинной трубы. Он сводил тепловой баланс, измеряя повышение теплосодержания воздуха. Указаны отклонения от баланса: при больших скоростях воздуха $\pm 2\%$, при малых $\pm 4\%$. Недостаток исследований Нуннера заключается в увеличении ошибки измерений с уменьшением теплового потока и в трудностях при определении параметров пара. Н. Г. Стюинг [83] создал установку по исследованию теплообмена при кипении, используя паровой обогрев плоских поверхностей

Необходимость локализовать исследование теплообмена привела к тому, что различные авторы начали применять секционирование парового обогрева. Дрю и Райен [51], исследуя распределение α на поверхности цилиндра при поперечном обдуве воздухом, разделили полый цилиндр на отсеки продольными перегородками и измеряли конденсат из каждого отсека. Естественно, что они смогли получить лишь усредненные на больших участках поверхности значения α .

Несмотря на недостатки подобного секционирования и неудобства проведения экспериментов, такая методика применяется до настоящего времени [3,32]. Гул [114], при измерении локальных коэффициентов сопротивления и теплоотдачи в диффузоре при турбулентном дозвуковом течении воздуха, заделывал в стенку диффузора медную плиту, обогреваемую паром. Размер секции составлял $50 \times 50 \times 150$ мм (в поперечном сечении относительно направления дельта воздуха). Чтобы избежать утечек тепла, Гул применил охранный паровой обогрев и бакелитовую изоляцию. Сравнивая полученные данные с расчетными данными гидродинамической аналогии Кармана—Рейнольдса, он указывает на плохое их совпадение.

Несовпадение полученных Гулом результатов с гидродинамической теорией теплообмена объясняется неправильной организацией измерений. Нагреваемая паром медная площадка омывалась потоком, подготовленным только гидродинамически соответствующим моделированием геометрии и скоростного режима потока в диффузоре. Тепловой же подготовки потока не было. Поэтому холодный поток, попадая на нагреваемый участок, отводил существенно больше тепла, чем это могло иметь место при подготовленном потоке.

В опытных установках, использующих изменение агрегатного состояния, характерно то, что подвод рабочего вещества про-

изводится объединенно, а продукт исследуемого процесса отводится индивидуально. При исследованиях с нагревом секционированно отводится конденсат, при охлаждении за счет испарения — получающийся пар.

В качестве примера установки с отводом тепловой энергии посредством кипящей жидкости рассмотрим экспериментальный стенд, описанный в работе [33]

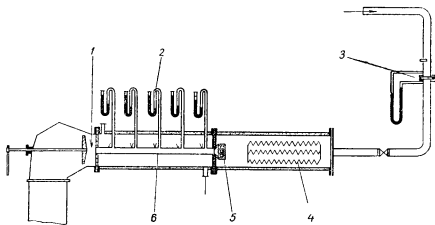


Рис 2 Схема установки по исследованию теплообмена при высоких скоростях

1 — термометры 2 — манометры 3 — диафрагма 4 — нагреватель 5 — уплотнитель 6 — измерительный участок

Исследовался теплообмен воздуха с трубой при малых температурных напорах. Принятая система исследования позволила достигнуть высокой точности измерений. Общая схема установки показана на рис. 2.

Воздух от компрессора после предварительной очистки проходит через мерную дроссельную шайбу 3, электрический нагреватель 4 и поступает к экспериментальному участку. Рабочий участок трубы 6 расположен в камере, заливаемой водой. При работе установки вода кипит за счет нагрева от горячего воздуха, продуваемого через трубу. Питание водой происходит непрерывно. Вода кипит при атмосферном давлении. Расход питательной воды, а следовательно, и пара определяется посредством мерного бака.

Тепловой баланс сводится по расходу электроэнергии, разности теплосодержаний воздуха и количеству энергии, потребляемой при кипении воды. Расхождение в тепловом балансе не превышает 5%, что свидетельствует о высокой культуре в организации эксперимента

Как и при конденсации, в описываемой установке можно было бы предусмотреть разделительные перегородки, которыми экспериментальный участок разделялся бы на отдельные секции. При этом возможно индивидуальное исследование теплопередачи на каждой секции.

Довольно оригинально этот принцип используется в приборе для определения коэффициента теплопроводности по методу пластины в испытательной лаборатории Национального института Франции [95]. Холодильником в приборе служит сосуд с кипящей жидкостью (вода, органические теплоносители). Центральная часть сосуда, сообщающаяся с кольцевой частью, имеет отдельный отвод пара, который направляется в выносной холодильник, а объем образующегося конденсата измеряется мензуркой. Пар из кольцевой (охранной) части сосуда конденсируется на охлаждаемом змеевике в верхней части сосуда, а конденсат стекает обратно. По количеству пара, образовавшегося на центральной части, и по ее площади судят об удельном тепловом потоке.

Принцип сообщающихся сосудов с кипящей жидкостью и разделным забором пара использован В. К. Ермолиным [34] для определения местных значений коэффициента теплоотдачи при исследовании интенсификации теплообмена в трубе за счет закручивающих воздушный поток вставок. Охлаждение трубы производилось кипящей водой, поступающей в кожух трубы из отдельного бака. Секционирование участков выполнено с помощью поперечных перегородок. Образующийся пар отводился из верхней части отсеков с помощью паросборных сосудиков, исключающих выброс влаги, и после охлаждения в холодильниках конденсат поступал в мензурки для измерения.

Необходимо отметить весьма удобное обстоятельство, связанное с конденсацией и кипением. Оно заключается в возможности идентичного нагрева по всей поверхности теплообмена. При этом области, соседние с исследуемой, могут находиться в условиях, близких к натурным. Достаточно хорошему моделированию подвергается теплообмен в локально исследуемом участке и на соседних сопряженных участках, что способствует объективному «тепловой истории» потока, на что было указано в введении

6. ВОДЯНЫЕ КАЛОРИМЕТРЫ

Водяное калориметрирование распространено так же широко, как и паровое. По точности измерения и возможности локализации этот метод сопоставим с предыдущим, однако наряду с некоторыми оперативными преимуществами в постановке эксперимента наблюдаются затруднения в борьбе с утечками тепла

Не останавливаясь на многочисленных конструкциях водяных калориметров, приведем лишь две: Лельчука, описанную в работе по исследованию теплообмена в трубе при течении горячего воздуха с дозвуковыми скоростями и охлаждении трубы [57], и Перри, описанную в работе по исследованию теплоотдачи струи горячего газа, направленной под различными углами в плоской стенке [129].

В. Л. Лельчук [57] исследовал локальный теплообмен, дифференцируя кривую температур охлаждающей воды по длине трубы. Для равномерного распределения охлаждающей воды по окружности кольцевой щели автор предпринял смелую попытку турбулизовать поток воды за счет вдувания в воду сжатого воздуха. По-видимому, эта попытка ему удалась, так как, по его данным, тепловой баланс, сведенный по измерениям локальной теплоотдачи, общего количества тепла по воде, а также по воздуху, имел расхождение в пределах $\pm 5\%$.

Перри [129] применил один из самых малых известных нам водяных калориметров. Установка представляла собой металлическую плиту, обдуваемую из сопла горячим воздухом и охлаждаемую проточной водой. Собственно калориметр — металлический диск диаметром 16,5 мм заделывался заподлицо с поверхностью плиты и изолировался от плиты слоем слюды в 0,1 мм (рис 3). Изменение температуры охлаждающей калориметр воды измерялось хромель-константановой дифференциальной термопарой, сигнал которой регистрировался с помощью усилителя постоянного тока и миллиамперметра. В стандартной в английской практике медь-константановой термопаре медь была заменена из-за опасности утечки тепла по медному термоэлектроду. Корпус калориметра, содержащий каналы для подвода воды к диску и устройства для крепления термопар, был изготовлен из плохо проводящего тепло акрилатного пластика — переспекса.

Достоинство такой схемы исследования локального теплообмена в том, что поверхность калориметра и остальной плиты имеет примерно равную температуру и существенных возмущений в тепловую и гидродинамическую картину обмена калориметр не вносит.

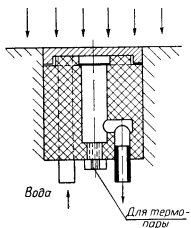


Рис. 3 Схема водяного калориметра

Электронагревательные устройства в экспериментальной практике применяются в самых различных отраслях техники. Преимущество их очевидно: простота регулирования, компактность, высокая точность измерений и, что важно для решения различных теплотехнических задач, возможность задать постоянный во времени тепловой поток. Условия создания контролируемого теплового потока для исследуемого участка поверхности при этом во многом сходны с условиями для парового обогрева — необходимость в охранных нагревателях или тщательной изоляции. Кроме того, возникает осложнение в виде контроля отсутствия перетекания тепла одного нагревателя к другому. Установка получается обычно довольно громоздкой. Упростить ее удается лишь в отдельных случаях, например, при определении теплопроводности по методу одного нагревателя и двух пластин [113]. Плоский нагреватель помещали между двумя идентичными пластинами испытываемого материала и измеряли мощность, расходуемую на центральном участке нагревателя, и перепады температур на обеих пластинах. Однако, по свидетельству И. К. Камилова [42] и С. Д. Рахмановского, подобрать совершенно одинаковые образцы испытываемого материала невозможно, а при небольших различиях в свойствах образцов и их препарировке метод может привести к заметным ошибкам.

Электрическое калориметрирование для целей исследования локального конвективного теплообмена было предложено М. В. Киричичевым [46] при изучении поперечного обтекания цилиндра воздухом. Киричичев располагал платиновые полоски по образующей цилиндра. Полоска служила одновременно калориметром и термометром сопротивления. Аналогичные опыты провел А. С. Синельников и А. С. Чашихин [80] с нихромовой лентой на фарфоровом цилиндре.

В принципе этот же метод применил и Л. А. Кузнецов [53] при исследовании теплоотдачи круглой струи воздуха, вытекающей в щель. Он измерял локальные тепловые потоки на стенке, противоположной той, в которой размещалось сопло под прямым углом к стенке, на различном расстоянии от оси сопла. Для создания и измерения теплового потока служил калориметр — медный патрон диаметром 10 мм с константановым стержнем внутри (в паре с медью патрона получалась термопара для измерения температуры поверхности калориметра), вокруг которого навивалась спираль электронагревателя (рис. 4). Калориметр заделывался заподлицо со стенкой из теплоизоляционного материала. Потери тепла к стенке составляли существенную долю энергии, выделяющейся в калоримет-

ре. Поэтому автору пришлось перед каждой серией опытов с различным диаметром сопел и шириной щели проводить определение потерь тепла калориметром, закрывая его торцовую (рабочую) поверхность теплоизоляционным колпачком, и даже вывести для этих потерь эмпирическую формулу. Несмотря на все трудности и неточности, ему удалось получить интересную картину теплоотдачи пластины, обдуваемой поперечным потоком воздуха.

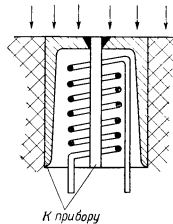


Рис 4 Схема электрокалориметра

и эллиптического цилиндров, а также работы Сергиевской [79] и Мальцева [60] по изучению теплоотдачи в элементах электрических машин).

Попыткой избавиться от недостатков электрического калориметрирования является создание переносного тепломера ОРГРЭС [37] для измерения тепловых потоков от поверхности термоизоляции в условиях естественной конвекции. Вся энергия электронного нагревателя направляется к охлаждающему воздуху за счет создания под нагревателем изолирующей прослойки с выравниванием температур нагревательного элемента и испытываемой поверхности (рис 5). Датчик помещен в теплопроводящий корпус такой конфигурации, что площадь испытываемой поверхности, закрываемой прибором, равна площади боковой поверхности корпуса. Если считать теплопроводность корпуса настолько большой, что теплообмен между нагревателем и корпусом отсутствует (в конструкции между ними оставлен воздушный зазор), а степень черноты поверхностей прибора и испытываемой одинакова, то получается изотермическая поверхность и искажение теплообмена может происходить лишь за счет возмущения потока корпусом тепломера, прикладываемого к испы-

Все рассмотренные, безусловно интересные, методы изучения локального теплообмена при помощи электрических калориметров, так же как описанный выше метод Гула, обладают существенным недостатком в них не сохраняется «тепловая история» потока. Если поверхности калориметров расположены впритык, то трудно измерить количество тепла, перетекающего от одного калориметра к другому. Тем не менее, этот метод применяется и до настоящего времени (см. например, работу Р. Себана [135] по изучению влияния турбулентности потока на теплообмен при поперечном обтекании кругового

тупею поверхности. Высота тепломера 9, диаметр 56 мм, так что, по-видимому, его можно применять лишь при малых скоростях набегающего потока и на сравнительно крупных объектах. Точность измерений $\pm 5\%$ при тепловых потоках $0-580 \text{ вт/м}^2$ и $\pm 10\%$ при $0-116 \text{ вт/м}^2$, инерционность тепломера $3-5 \text{ мин}$.

Г. Г. Счастливыи [84] к устройству аналогичной конструкции добавил еще один нагреватель, который помещается под изо-

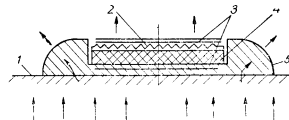


Рис 5 Схема тепломера ОРГРЭС

1 - испытываемая поверхность 2 - нагреватель 3 - термометр 4 - тепловая изоляция 5 - корпус

лирующей прослойкой (рис 6) и таким образом измеряет тепловой поток, создаваемый верхним нагревателем. Он использует такие приборы для измерения локальных коэффициентов теплоотдачи от самого прибора к принудительному потоку воздуха в каналах электрических машин, не забываясь о сохранении изотермичности теплоотдающей поверхности, а в случае обдувания холодным воздухом — холодной поверхности, даже специально

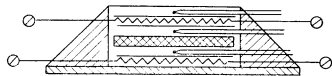


Рис 6 Схема тепломера Института электротехники АН УССР.

нарушая эту изотермичность. Тем не менее такой прием можно, по-видимому, применить при выяснении сравнительной эффективности теплоотдающих поверхностей различной конфигурации без проведения тепловых опытов.

В В. Мальцев [60] использует, например, подобные датчики только в виде полого цилиндра, при холодных продувках модели ротора электрической машины.

В опытах же с определением тепловых потоков в натуральных условиях теплообмена необходимо стремиться к сохранению такой же температуры на участке поверхности, занятой тем или иным тепломером, как и на участке поверхности без тепломера

Так, акад. А. Ф. Иоффе [39] предлагал обеспечивать с помощью полупроводниковых термоэлектрогенераторов постоянно температурных условий на участках поверхности, занятой тепломером, и вне зоны его влияния при измерении теплового потока, а при измерении радиационного потока — равенство температур приемника радиации и окружающего воздуха

8. ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ПЛАВЛЕНИИ

Тепловые потоки при конвективном обмене можно определить, с известными ограничениями, по количеству вещества твердой поверхности, расходуемого на таяние или сублимацию

Определение локальных коэффициентов теплоотдачи при обдувании воздухом цилиндров из льда проведено В. Клейном в 1933 г. [51]. Клейн измерял количество льда, ставшего на различных участках поверхности цилиндра, и по нему и теплоте плавления судил о тепловых потоках от воздуха. Естественно, что при этом изменялась геометрическая форма цилиндра, часть жидкости испарялась и происходили другие осложняющие картину изменения, что не могло не сказываться на точности измерений

А. Г. Ткачев [85] определял коэффициенты теплоотдачи при плавлении цилиндров и шаров в большом объеме жидкости (воды, бензола и этиленгликоля). Однако в измерениях и расчетах он не учитывал неравномерности теплообмена по периметру твердого тела, хотя, если судить по описанию установки (непрерывное проектирование профиля тела с двух сторон на экран), это сделать было нетрудно. Коэффициент теплоотдачи и безразмерные критерии определялись из условия, что изменение агрегатного состояния не оказывает влияния на теплообмен. Совпадение данных Ткачева с опытными данными по «чистому» теплообмену не везде удовлетворительно (случай с горизонтальными цилиндрами). По-видимому, при решении подобных задач необходимо рассматривать совместно явления тепло- и массопереноса

9. МЕТОДЫ АНАЛОГИИ

Аналогия между переносом количества тепла, массы и энергии уже более полувек использовалась для косвенного исследования тех или иных явлений. Несмотря на имеющиеся весьма серьезные ограничения для таких приемов, соображения удобства, простоты, а зачастую и точности приводят к тому, что по данным о коэффициенте поверхностного трения судят о переносе массы или тепла, по коэффициенту диффузии — о коэффициенте теплоотдачи и наоборот, а недавно появилась работа

[136], в которой перенос количества движения (трение в пограничном слое) при сверхзвуковом обтекании пластины изучался на основе измерений переноса массы (сублимация нафталина)

Остановимся на работе [13], в которой изучение теплоотдачи трубног пучка производилось методом аналогии между диффузией и теплообменом. В аэродинамической трубе разомкнутого типа размещался пучок трубок диаметром 28 мм из пористого фарфора, подпитываемых изнутри водой. В одной из трубок — измерительной — двумя продольными прорезями была выделена по питанию вторая полоска шириной 8 мм. Трубка поворачивалась на каждые $\frac{\pi}{12}$ рад, и по количеству испарившейся воды, температуре потока до и после трубки и соответствующей температуре мокрого термометра определялся местный коэффициент теплоотдачи α . Необходимо отметить, что полной аналогии в этой работе достигнуто не было, процесс определялся скорее теплообменом, чем диффузией, и методически работу можно сравнивать с упомянутым выше исследованием Клейна.

Находить поля температур и тепловых потоков при известных граничных условиях можно методами электрической и гидравлической аналогий. Эти методы основаны на том, что явление тепло- и электропроводности, а также фильтрации, магнетизма и т. п. описываются одним и тем же уравнением Лапласа. Электротепловая аналогия осуществляется построением электрической модели с помощью электропроводной бумаги, электрической ванны или сетки сопротивлений и емкостей, с соблюдением всех условий моделирования: геометрического подобия, подобия потенциалов (соответственно пропорциональности температуры и электрического потенциала), полей тепло- и электропроводности и граничных условий

Методика решения стационарных двумерных задач теплопроводности разработана О. А. Геращенко [18], примененным для этой цели электронтермостат ЭГДА П. Ф. Фильчакова и В. И. Панчишина. Благодаря своей простоте, эта методика получила широкое распространение. Исследование сводится к отысканию эквипотенциальных линий (изотерм) или линий равного тока (поле теплового потока) на модели из электропроводной бумаги. Детальное описание установки дано в гл. V.

В случае моделирования в электролитической ванне проводящей средой являются слабые растворы электролитов. При этом представляются некоторые возможности трехмерного моделирования (за счет изменения толщины слоя электролита)

Метод сеток [77] отличается тем, что моделирование становится дискретным: исследуемые контур разбивают на отдельные элементы, термическое сопротивление которых считается приложенным между центрами линий разбивки и моделируется соот-

ветствующими электросопротивлениями. Теплоемкости частей тела при этом моделируются емкостями, приложенными к узлам сетки.

Метод гидравлического моделирования на гидронтеграторе В. С. Лукьянова предполагает такую же разбивку на элементы. Тепловое сопротивление при этом моделируется гидравлическим сопротивлением трубок с регулируемой длиной, теплоемкость — емкостью подключенных к трубкам сосудов. Граничные условия задаются напором в сосудах, подключенным к граничным трубкам. Температурное поле находится измерением напоров в каждой трубке.

Погрешность в определении температурного поля методами электрической и гидравлической аналогии при точном задании граничных условий не выходит обычно за пределы $\pm 5\%$. При определении поля тепловых потоков величина ошибки может существенно возрасти, как это происходит в тех случаях, когда искомая величина определяется дифференцированием опытных данных.

В некоторых случаях эти методы применяются и при неустановившихся тепловых режимах, однако сложность аппаратуры при этом возрастает, а точность измерений — соответственно падает.

10. ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОБМЕНА

Известно, что скорость распространения света в физически однородной среде определяется оптической плотностью среды, зависящей от температуры и давления. При наличии градиента плотности (массовой плотности, определяющей оптическую плотность среды) всякий световой луч, неперпендикулярный вектору градиента плотности, отклоняется от прямой. Угол отклонения луча прямо пропорционален линейному интегралу от векторного произведения градиента оптической плотности на элементарный путь в пределах исследуемого участка прохождения луча.

Эрнст Шмидт использовал это явление для количественного изучения конвективного теплообмена. Описание метода Шмидта приведем по работе В. С. Жуковского, А. В. Киреева и Г. П. Шамшева [36], исследовавших распределение коэффициента теплоотдачи по окружности цилиндра для случая вынужденного поперечного потока. Исследуемый цилиндр с торца освещается узким кольцевым пучком параллельных лучей света. Отклонение лучей регистрировалось на пленку с противоположного торца. Угол выхода луча, входящего с непосредственным скольжением по поверхности цилиндра, пропорционален градиенту температуры, а следовательно, и тепловому потоку через поверхность на данной образующей при ламинарном течении

Обработка экспериментальных данных показала очень хорошее согласование теплового баланса на установке при малых значениях тепловых потоков.

При больших потоках замечались существенные отклонения в балансе, что объясняется тем, что большим потокам соответствуют большие отклонения луча уже в самом начале цилиндра: луч переходит в область более слабых градиентов. Может случиться, что, еще не достигнув удаленного торца цилиндра, луч выйдет за пределы пограничного слоя; тогда нарушается предположение о постоянстве температуры и градиента вдоль луча, на котором базировались выводы зависимости, позволяющих определить тепловые потоки.

Таким образом, изложенный оптический метод можно применять только при достаточно малых потоках через поверхность с небольшими длинами исследуемых поверхностей вдоль луча. Обычно подобные оптические приемы используются для получения качественных физических картин изучаемых явлений, связанных с гидродинамикой и теплообменом.

Описанная работа была выполнена при участии Д. Д. Максимова — автора широко известных менниковских телескопов и объективов.

II. МЕТОД ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ СТЕНКИ

Для определения теплового потока можно измерять разность температур на гранях дополнительной стенки с известной теплопроводностью, нанесенной на исследуемую деталь по изолирующей поверхности. Тогда тепловой поток определится из простого уравнения:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} \Delta t, \quad (2.1)$$

где λ и δ — соответственно теплопроводность и толщина дополнительной стенки; Δt — падение температуры на дополнительной стенке при прохождении теплового потока q .

Для практического применения этого метода тепловое сопротивление стенки должно быть существенно меньше сопротивления, оказываемого распространению тепла до нанесения дополнительной стенки; необходимо знать с большой точностью λ и δ дополнительной стенки или тарировать каждое устройство по известному тепловому потоку, а также оценивать возможные искажения линий тока и сопротивление контакта. Метод применим для установившегося теплового режима. Для измерения тепловых потоков при нестационарном режиме постоянная времени дополнительной стенки должна быть на несколько порядков меньше, чем постоянная времени изучаемого процесса.

Одним из наиболее распространенных приборов, построенных на принципе дополнительной стенки, является тепломер Шмидта, подробно описанный в работах [63, 68]. Тепломер представляет собой резиновую ленту длиной 600—650, шириной 60—70 и толщиной 3—5 мм. На обеих поверхностях ленты заформовано большое количество (выше 200) спаев термопар, включенных последовательно и расположенных попеременно

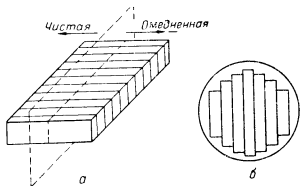


Рис 7 Схема изготовления термопар тепломера с до-
полнительной стенкой (а) и расположение спаев в
круглом тепломере (б)

на одной, то на другой стороне ленты. Э д с такой батареи термопар пропорциональна разности температур на поверхностях ленты. Для избежания искажения линии теплового потока рядом с измерительной лентой укладываются охранные ленты без термопар.

Существенным недостатком тепломера Шмидта является его громоздкость и сравнительно большое термическое сопротивление, в связи с чем он применяется лишь для измерения тепловых потерь через изоляцию на трубопроводах.

Большая работа по уменьшению габаритов и инерционности тепломеров Шмидта, а также по применению этих приборов для различных задач строительной теплофикации проделана С. Д. Рахмановским. Одним из первых он начал выполнять тепломеры в виде дисков или квадратных пластин, локализуя этим измеряемый тепловой поток. В настоящее время в «Теплопроект» (Москва) под его руководством изготавливаются и тарируются тепломеры-диски диаметром 60—90 и толщиной 3—8 мм для измерения тепловых потоков до 10^4 вт/м² в различных строительных конструкциях. Применение метода изготовления компактной батареи термопар — намотки на дополнительную стенку большого числа витков константановой проволоки или ленты с последующим ометанием половины каждого витка электролитическим способом (рис 7) позволяет при сравни-

тельно небольших габаритах тепломера развивать достаточный сигнал, чтобы тарировать его со стрелочным милливольтметром. Дополнительной стенкой являются паронитовые стержни квадратного сечения, набираемые после обмотки их и меднения константана в диски или квадраты, с паронитовыми же тонкими прослойками между стержнями. Коэффициент теплового расширения также из паронита, поэтому пределы рабочей температуры тепломера составляют 140°С. Тарировка тепломеров производится на стенде, состоящем из электрообогреваемой пластины с центральными и охранными нагревателями. Удельный тепловой поток определяется по расходу тепла центральным нагревателем, когда утечки тепла в стороны от него скомпенсированы охранными нагревателями. Вся пластина может вращиваться вокруг горизонтальной оси на α ради и закрепляться в промежуточных положениях для возможности приближения условий тарировки прибора к производственным условиям измерения тепловых потоков. Существенным недостатком такого метода тарировки является его длительность — до 8 ч на каждую точку тарировки.

Метод ускоренной тарировки тепломеров с использованием регулярного теплового режима изложен в работе [61].

Точность измерения тепловых потоков тепломерами, очевидно, лежит в пределах 3—8%. Подобные приборы были разработаны также Черединочико и Альберовичем [65].

Тепломер Альберовича (Ленинградский институт холодильной и молочной промышленности) представляет собой резиновый диск диаметром 300 и толщиной 6 мм, в центральную часть которого диаметром около 200 мм вмонтировано от 600 до 900 спаев батареи дифференциальных термопар. С обеих сторон на диск вулканизируется слой резины толщиной 2 мм. С помощью такого прибора производились измерения весьма малых потоков тепла, например, через перегородку между двумя холодильными камерами.

К недостаткам описываемого тепломера относятся его большие габариты и зависимость чувствительности по тепловому потоку от температуры диска, вызванная изменением с температурой свойств дополнительной стенки и омического сопротивления батареи термоэлементов, а также соответствующим последнему изменением показаний вторичного прибора — милливольтметра.

В 1953 г. американская фирма Бекман и Вантли [131] опубликовала краткие сведения о приборе для измерения тепловых потоков, аналогичном описанным выше. Габариты датчика 115×115, толщина дополнительной стенки 1,5 мм. Материал термопар — серебро-константан, чувствительность прибора — 19 вт/м²·мв.

Английская фирма Джоис и Лэбл в 1956 г. выпускала дисперсионные термометры двух серий — диаметром 50 и 110 мм [108]. Сплав термопар заделывались в матрицу из полиэтилена, что позволяло применять такие диски только при температурах до 70°С.

В заключение описания группы малых термометров Шмидта укажем на прибор для измерения расхода тепла на обогрев помещения калориферами, демонстрировавшийся фирмой «Регула» на Чехословацком выставке приборов в Киеве в 1962 г. [102]

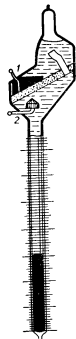


Рис 8 Электрохимический счетчик
1 — анод, 2 — катод

Отличительной особенностью этого прибора является включение в цепь датчика типа «пояс Шмидта» электролитического ртутного счетчика постоянного тока. Основным элементом электролитического счетчика — стеклянный сосуд, имеющий в верхней части пористую полупроницаемую перегородку (рис 8). Электролит представляет собой раствор йодистого ртути с примесью иодистого калия для стабильности процесса электролиза ртути. Анодом служит ртуть, катодом — расположенный под наклонной пористой перегородкой угольный конус.

Действие счетчика основано на том, что при протекании электрического постоянного тока через электролит в соответствии с законом Фарадея на аноде растворится, а на катоде выделится водород или металл (в данном случае ртуть) в количестве, пропорциональном количеству протекшего электричества (в к)

При постоянном сопротивлении цепи такого прибора определенному количеству тепловой энергии соответствует вполне определенное количество электричества, протекающего по цепи. Таким образом, количество выделяемой на катоде ртути пропорционально количеству тепловой энергии, прошедшей через первичный датчик за все время измерения.

Ртуть с катода в виде мелких капелек стекает в расположенный под ним мерный цилиндр с делениями. Прибор является интегрирующим и может показывать общее количество тепла, полученное потребителем за срок измерения, месяца, отопительный сезон.

По окончании отсчета регистрирующий прибор переворачивается на 180°; при этом ртуть, переливаясь в верхнюю часть сосуда, освобождает мерный цилиндр для новых измерений.

Всем приборам этой группы присущи следующие качества:

- 1) возможность измерять тепловые потоки на площадках порядка 10^2 — 10^3 см² — элементах отопительных панелей, изолированных трубопроводов и т. п.;
- 2) весьма большой выходной сигнал;
- 3) большая точность измерений при точной градуировке прибора;
- 4) низкие рабочие температуры;
- 5) большие инерционность и термическое сопротивление (порядка $0,005$ м² · град/вт).

Уменьшая толщину дополнительной стенки и ее площадь, т. е. количество спаев термопар, можно за счет некоторой потери чувствительности добиться большей локализации измерений и снизить инерционность прибора В американском комитете по авионавигации (НАСА) для исследования теплообменных характеристик сверхзвуковых летательных аппаратов были использованы термометры с золотой дополнительной стенки менее 1 мм [118, 137]. Слэк [137] измерял локальные тепловые потоки и определял локальный коэффициент восстановления по длине плоской искусственно охлаждаемой пластины при обтекании ее потоком воздуха при $M=2,4$ и $Re=1,5 \cdot 10^5$ — $3 \cdot 10^6$ (ламинарный, переходный и турбулентный граничные слои). Термометры представляли собой полоски пластика размером $38 \times 9,6 \times 0,4$ мм, которые вместе с намотанными на них электродами дифференциальных термопар заклеивались между двумя сплошными листами пластика так, что короткой стороной термометры располагались поперек движения воздуха. Слэк использовал показания термометров как для определения тепловых потоков, так и для определения температуры поверхности пластины и локального коэффициента восстановления. Температура поверхности пластины T_s определялась по показаниям термопар, заделанных под слоем пластика, содержащего термометры. К этим показаниям добавлялось Δt , полученное из значений теплового потока и теплового сопротивления пластика. Коэффициент восстановления определяется из соотношения

$$r = \frac{T_s - T}{\theta - T}, \quad (2.2)$$

где T_s — собственная температура стенки, t — температура, которая устанавливается на стенке при адиабатическом нагревании потока [по 63]; T — термодинамическая температура газа; θ — температура торможения.

Для определения местных значений фактора восстановления в уравнении (2.2) термодинамическая температура T , локальные значения которой практически невозможно измерять непо-

средственно, определяется косвенно по местным значениям числа Маха. Это преобразует уравнение (2.2) в следующее:

$$r = 1 - \frac{\Theta - T_c}{\Theta} \left[\frac{2}{(k-1)M^2} + 1 \right]. \quad (2.3)$$

Местные значения чисел Маха могут быть определены различными прямыми и косвенными методами, в частности по измерениям статических и динамических напоров.

В опытах не было возможности получить адиабатические условия на поверхности пластины для определения собственной температуры стенки T_c . Поэтому ее подсчитывали из данных по теплопередаче экстраполируя удельного теплового потока q как функции отношения $\frac{T_w}{\Theta}$ к условиям нулевого

теплообмена. По данным Слэка [137], ошибка в измерениях q составляла $\pm 5,5\%$; $T_w = \pm 7,2^\circ\text{C}$; $T_c = \pm 2,7^\circ\text{C}$ и $r = \pm 0,01$.

Де Лауэр [105], [99] провел эксперименты с плоской пластиной при $M = 5,8$. В качестве дополнительной стенки для тепломеров, аналогичных описанным выше, он использовал бакелитовый лист толщиной 0,4 мм. Для предотвращения конденсации на опытном участке температура воздуха в форкамере в его опытах должна быть выше 93°C . Поэтому для эксперимента по теплообмену с нагреваемой пластиной была бы необходима температура поверхности $200-300^\circ\text{C}$, которой бакелитовые тепломеры не выдерживали бы. Поэтому де Лауэр, так же как и Слэк, проводил опыты с аэродинамическим нагревом; рабочая температура тепломеров не превышала $30-60^\circ\text{C}$.

Для дополнительной стенки можно использовать некоторые из огнеупорных материалов, что повысило бы рабочую температуру тепломера. Однако формовка термопар в такие материалы весьма затруднительна. Некоторые исследователи делали попытки использовать вместо термопар термометры сопротивления. Браун и др. [16] вжимали платиновую краску с двух сторон таблетки из пирокерама (жароупорное стекло) или алунда диаметром 6,3 и толщиной 0,5 мм. Термометры сопротивления получались в виде тонкой платиновой пленки подковообразной формы. К концам пленки припаивались серебряные выводы. При этом ошибка в измерениях теплового потока достигала 17%, а рабочая температура датчиков не превышала 120°C . Приборы использовались при исследовании аэродинамического нагрева в сверхзвуковой аэродинамической трубе.

Довольно оригинальным является метод измерения местных тепловых потоков в круглой трубе, когда участки трубы служат и дополнительной стенкой и термометрами сопротивления [125]

При измерениях используют скин-эффект пропуская по участку трубы постоянный ток, получают значение сопротивления участка трубы как функции среднен по длине и радиусу температуры; пропуская затем переменный ток, получают функцию от температуры наружных слоев трубы. Сравнение этих двух функций дает представление о тепловом потоке на данном

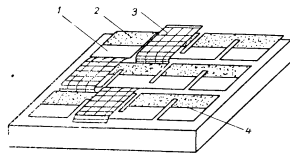


Рис. 9 Устройство измерительной стенки биологического калориметра
1 — медь 2 — константан 3 — стеклоткань 4 — место спаев

участке трубы. Естественно, что для получения значений теплового потока нужно знать коэффициент теплопроводности материала трубы или тарировать все устройство по тепловому потоку. Достаточно частоты переменного тока 830 ци , чтобы получить четкую зависимость от теплового потока. Отдавая должное принципиальному изысканию, нельзя не выразить сомнения в достоверности полученных результатов измерений.

Своеобразно использовали дополнительную стенку Лютон и др. [117] в конструкции калориметра для определения теплоотдачи и теплопродукции животных.

Калориметр (рис. 9) представляет собой камеру для животного, стенки которой оклеены стеклотканью, перелетенной с медно-константановыми ленточками. Ленточки порезаны с обеих сторон так, что поочередно остаются константановые или медные мостики. Каждая секция между двумя мостиками представляет собой термоспай. Разность температур (и термо-ЭДС) создается за счет того, что один из спаев открыт для нагрева из калориметра, другой закрыт слоем стеклоткани толщиной 0,4 мм и прикасается к стенке калориметра. Дифференциальные термопары соединены последовательно и чувствительность эсего тепломера весьма высока.

12. ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ ЭЛЕКТРОД ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ТЕРМОПАРЫ В КАЧЕСТВЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ СТЕНКИ

Термомеры, устроенные по принципу дополнительной стенки, состоят из двух элементов, выполняющих разные функции собственно стенки для создания разности температур и термометров для ее измерения. Трудности в сочленении этих элементов, разные возможности их в отношении рабочих темпера-

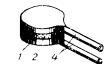


Рис. 10 Схема датчика теплового потока

- 1 — крайние пластины;
2 — средняя пластина;
3 — исследуемое тело;
4 — съемные проводящие диски

туры, большое тепловое сопротивление и инерционность изоляционных материалов, наконец, необходимость локализовать измерения теплового потока на участках порядка $0,1-0,5 \text{ см}^2$ привели к попыткам объединить функции этих элементов. В разное время Г. П. Иванов [38], О. А. Герашенко [19], Джойс и Лэбл [107] предложили использовать в качестве дополнительной стенки промежуточный электрод дифференциальной термопары, выполняя его в виде дисков или шайб (рис. 10). К обоим краям диска прикрепляются тонкие пластины и съемные проводники из другого «парного» термоэлектрического материала. Использовать сигнал дифференциального термоэлемента-пластины за счет разности температур на ее краях впервые предложил Х. И. Амирханов [4], однако не для измерения теплового потока, а для контроля его отсутствия. Изучая свойства различных полупроводниковых материалов, он нашел, что некоторые из них (Cu_2O , PbS) можно применять для изготовления охранной пластины в приборе для измерения теплопроводности. С одной стороны охранной пластины располагается центральный нагреватель, с другой — охранный Регулируемый ток в охранном нагревателе добавляется, чтобы в цепь медь—закись меди—медь, в которую включен чувствительный гальванометр, значение тока было сведено к нулю. Термо-э. д. с., развязываемая таким термоэлементом за счет разности температур на его краях в 1 град , составляла $1,17 \text{ мв}$. Чувствительный элемент изготавливался из медной пластинки, закисленной при 1000°C с последующим охлаждением в жидком кислороде.

Впоследствии Х. И. Амирханов и А. М. Керимов использовали этот же принцип в установке по исследованию теплоемкости воды и водяного пара при высоких давлениях [5].

Установка представляла собой шаровой адиабатически калориметр объемом 163 см^3 , составленный из двух стальных кон-

центрических оболочек с зазором между ними 3 мм . В зазор через отверстие засыпался порошок закиси меди. Для уплотнения порошка внутренний сосуд охлаждался проточной водой, наружный — разогревался до $500-600^\circ \text{C}$; вся система при этом подвергалась высокочастотной вибрации. Во время опытов стон закиси меди передавал давление на стенки наружного сосуда, что позволило уменьшить толщину стенки сосудов. Закись меди в паре с металлом оболочек играла роль дифференциального термоэлемента, по его показаниям температура наружной оболочки поддерживалась в течение всего опыта равной температуре внутренней оболочки. Отклонение от адиабатических условий опыта не превышало $0,2\%$ количества тепла, расходуемого на нагрев исследуемого вещества. В последующей работе [6] потери тепла уменьшены еще на один порядок.

Наконец, И. К. Камиллов [42] при определении коэффициента теплопроводности некоторых плохих проводников тепла по методу плоской пластины использовал сигнал меднозакислого термоэлемента, аналогичного описанному в [5], для автоматической компенсации потери тепла от центрального нагревателя через охранную пластинку. Нулевого показание чувствительного «реального гальванометра, замкнутого на термоэлемент, автоматически поддерживалось фотоэлектрическим терморегулятором с тиратронной схемой усиления фототока. Рабочий ток тиратрона использовался непосредственно для питания компенсационного нагревателя. Максимальная разность температур на краях термоэлементов при этом не превышала $0,001 \text{ град}$. Рабочая температура элемента составляла $80-500^\circ \text{K}$.

Авторы настоящей книги пытались использовать в качестве промежуточного слоя различные полупроводниковые материалы с большими термо-э. д. с. [22]. В частности, были исследованы Cu_2O , NiS , FeS_2 . Вследствие заметной зависимости термо-э. д. с. от температуры и главным образом из-за низкой механической прочности этих материалов пришлось отказаться от их применения в качестве элементов приборов для измерения тепловых потоков.

Сплав теллура с серебром, обладающий полупроводниковыми свойствами и высоким термоэлектрическим коэффициентом, использовали в дисках — детекторах теплового потока в Англии и Америке [107, 132]. Чувствительность таких детекторов очень велика и составляет $0,8 \text{ мкВ/ст. м}^2$.

Фирма Джойс и Лэбл [107] указывала на возможность измерения с помощью этих дисков локальных тепловых потоков и все же, очевидно, по причине сильной зависимости чувствительности от температуры, предпочла выпускать диски из полиэтилена с заделанными в него термопарами [108].

Полупроводниковые материалы продолжают привлекать внимание исследователей как объект для применения в датчиках теплового потока А. П. Перелешина [67] получила температурные зависимости для коэффициента теплопроводности некоторых полупроводников (кривые 1 и 2, рис. 11) В отношении

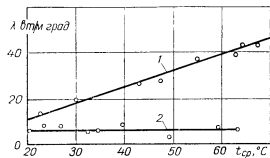


Рис 11 Графики зависимости $\lambda = f(t_{сп})$ для полупроводников из оксидов марганца

технической двуокиси марганца MnO_2 , содержащей 28% различных примесей, был сделан вывод, что в интервале температур 20—60°С ее теплопроводность не зависит от температуры (кривая 2, рис 11) Необходимо отметить, что этот вывод достаточного основания не имеет, так как из цифровых данных

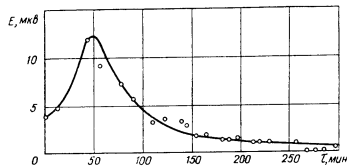


Рис 12 График изменения во времени термо-ЭДС полупроводникового датчика

приведенных Перелешинной, видно, что разброс точек около среднего значения превышает $\pm 50\%$. В той же работе указывается, что термо-ЭДС, развиваемая на гранях полупроводникового элемента за счет разности температур, существенно изменяется со временем, так как действие теплового потока нарушает равномерное распределение заряженных частиц (ионов кислорода) по объему элемента (рис. 12). В работах [52,

67], тем не менее, указывается на возможность измерения теплового потока с помощью полупроводниковых элементов из оксидов марганца, сульфидов и хлоридов серебра и др В обеих работах приводятся зависимости ЭДС от теплового потока (рис 13, а) или от разности температур (рис 13, б) на гранях

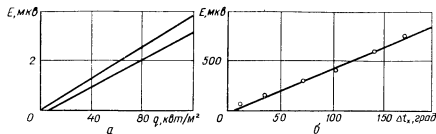


Рис 13 Градуировочные кривые полупроводниковых датчиков теплового потока

элемента. Зависимости эти, как видно из графиков, прямолинейны и однозначны. Единственным недостатком этих зависимостей, если судить по графикам, является наличие некоторой термо-ЭДС при нулевом тепловом потоке Однако этого достаточно, чтобы говорить о несимметричности и нестабильности процессов в термоэлементе

Авторы книги сосредоточили свои усилия на создании датчиков тепловых потоков из стандартных термоэлектродных металлургических материалов, идущих на изготовление термопар Термо-ЭДС этих материалов имеет прямолинейную зависимость от температуры в очень широком диапазоне, а теплопроводность их — очень слабую однозначную зависимость, которую в области температур от 0°С до точек полиморфных превращений или до температуры плавления также можно выразить уравнением прямой линии [95] с достаточной для практических целей точностью. Термопарные материалы не меняют своих термоэлектрических характеристик и в агрессивных средах. Некоторые из них (чистые металлы) удовлетворяют требованиям гомогенности. Датчик, изготовленный из металлургических материалов, механически прочен, его можно крепить на разнообразных предметах или заделывать внутрь изделия Тепловое сопротивление и инерционность его малы

Выходной сигнал (термо-ЭДС) датчика из стандартных термоэлектродных материалов при толщине среднего слоя в 1 мм составляет 0,1—0,3 мкВ на каждые 100 вт/м^2 теплового потока, и мощность, которую он может развить, имеет порядок 10^{-15} — 10^{-13} вт Такие величины измеряются лишь приборами высокой чувствительности Поэтому в измерительную схему

первых датчиков теплового потока был введен двухкаскадный дифференциальный магнитный усилитель. Для лучшей стабильности прибора питание его производилось через феррорезонансный стабилизатор напряжения и генератор стабильной частоты ЗГ-10 (рис 14). Все датчики проходили индивидуальную тарировку. Для получения контролируемых тепловых потоков

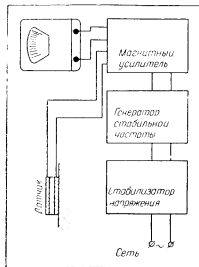


Рис. 14. Схема установки для измерения тепловых потоков с помощью металлических датчиков

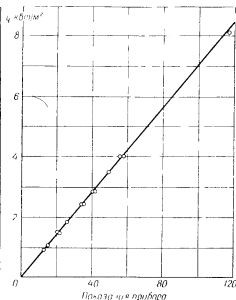


Рис. 15. Градуировочный график металлического датчика

был принят радиационный обогрев тарированных датчиков. Источником регулируемого лучистого потока служила муфельная печь со ступенчатым регулированием мощности через трансформатор. Интенсивность излучения печи на каждом режиме определялась с помощью термоэлектрического радиометра (см. раздел 23).

Расстояние от горловины муфельной печи до датчика или пластины радиометра контролировалось специальными шаблонами. Всякое измерение датчиком производилось между двумя контрольными замера радиометром. Для проверки влияния направления теплового потока при градуировке некоторые датчики подвергали облучению попеременно то одной, то другой стороной. Тепло от датчика отводилось с помощью медного блока или стальной трубы, охлаждаемой холодным водом.

Градуировочная кривая типового датчика приведена на рис. 15 [21]. Из графика видно, что в интервале тепловых по-

токов 0—10 квт/м² она является прямой, проходящей через начало координат. Таким образом, уже из опыта создания первых датчиков теплового потока видно, что авторы избрали верный путь.

Более подробные сведения о проверке на однородность материалов, идущих на изготовление датчиков, характеристики магнитного усилителя, а также описание методов изготовления и градуировки съемных и несъемных датчиков для тепловых потоков до $2 \cdot 10^4$ вт/м², приведены в работе [22]. К некоторым из этих вопросов мы вернемся в гл. IV.

В работ, в которых реферируются датчики теплового потока отметим [96, 104]. И. Чермак [104], описывая работы [21, 107], предлагает для увеличения чувствительности датчиков из металлических термоэлектродов делать промежуточный сток — дополнительную стенку — перфорированную. Это увеличивает тепловое сопротивление стенки и соответственно разность температур на ее гранях. Увеличение чувствительности датчиков даст такой же эффект, что и увеличение сигнала датчиков изготовленных нами сваркой на точечной конденсаторной машине.

Первую попытку практически использовать малогабаритные металлические датчики теплового потока авторы сделали при измерении локальных коэффициентов теплоотдачи от стенки трубы, обогреваемой паром, к зернистому материалу, перемещающемуся внутри трубы (на стенде паровой трубчатой сушилки) [88]. Федорову удалось получить качественную картину изменения α вдоль трубы при сушке украинского бурого угля (рост α , достижение максимума примерно посередине трубы и последующий плавный спад). Получить точные количественные характеристики не удалось.

13. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ПРИ НЕУСТАНОВИВШИХСЯ ИЛИ КРАТКОВРЕМЕННЫХ РЕЖИМАХ

Существует много различных методов нахождения температуры поля или граничных условий с помощью приближенных решений уравнения нестационарной теплопроводности. Большое место среди них занимают методы регулярного режима. В настоящее время созданы различные приборы и установки [11, 48 и др.], позволяющие по темпу охлаждения определять теплофизические характеристики материалов.

Некоторые приборы позволяют непосредственно по измерению той или иной величины судить о величине поступающего теплового потока.

Такой величиной может быть температура, если инерционность термометра достаточно мала. Б. Л. Григорьев [52] предложил для измерения тепловых потоков во времени весьма

чувствительную термопару из двух стержней, прессованных из тройных теллуристых сплавов (Te—Bi—Sn и Te—Bi—Se). Горячий спай — концы стержней, соединенные между собой тонкой металлической пленкой — заделывается заподлицо с поверхностью теплообмена. Такое устройство можно протарировать по переменному тепловому потоку и сигнал термопары будет соответствовать тепловому потоку до тех пор, пока не изменится температура холодных концов стержней. По данным Б. Л. Григорьева, сигнал такой термопары примерно в 10 раз больше, чем для обычных металлических термопар, и достаточно стабилен.

Недостатки такого прибора заключаются в необходимости пересчета тепловых потоков, если материал стенки отличается от материала стержней (при сильном отличии способ этот вообще неприменим), а также в трудностях при приведении толщины пленки и длины стержней в соответствие со временем воздействия тепла.

Келлер и Райен [116] заделывали на торце керамического блока термопару или термометр сопротивления и записывали изменение температуры во времени осциллографом. Перевод зависимости $t=f(\tau)$ в $q=f(\tau)$ осуществлялся на основании приближенных решений уравнения теплопроводности для полуограниченного тела. Термометры сопротивления, изготовленные путем вжигания платиновой краски в керамику, оказались на два порядка чувствительнее, чем термопары. Толщина пленки составляла около 1 мкм. Из керамических материалов наиболее подходящими оказались циркон (ZrO_2) и викар—борсиликатное стекло, имеющее очень малый коэффициент линейного расширения [134]. Этими приборами пользовались для измерения тепловых потоков от воспламенителя твердого ракетного топлива. Процесс горения воспламенителя двух типов — пиротехнического и газогенераторного — протекал не более 50 мксек. Отмечено, что налет продуктов сгорания на поверхности термометра изменял его сопротивление и тем мог исказить зависимость $t=f(\tau)$ и $q=f(\tau)$.

Роуз и Старк [133] изготавливали подобные термометры сопротивления для экспериментального определения теплоотдачи к телу, омываемому частично диссоциированным воздухом при весьма высоких скоростях, в точке полного торможения. Они пользовались двумя типами термометров — тонким, когда можно было полагать, что температура пленки все время равна температуре поверхности изолятора, и калориметрическим, когда подводимое тепло в основном аккумулировалось материалом термометра. Толщина платиновых термометров была соответственно 0,3 и 30 мкм. Материалом обтекаемого тела (цилиндр диаметром 12,7 мм со сферическим торцом) являлось огнеупорное стекло — пирекс.

Для перевода зависимости $t=f(\tau)$ в $q=f(\tau)$ для обоих типов термометров Роуз и Старк воспользовались решениями Фей и Риддела [109] для пограничного слоя с учетом передачи тепла теплопроводностью, конвекцией и диффузией атомов и молекул.

Методически интересна тарировка термометров-дисков пропусканием через пленку электрического тока для нагрева до необходимой температуры с одновременным снятием величины сопротивления термометра в поперечном направлении диска [116, 133]. Пригодность тонкопленочных датчиков для изучения быстропеременных процессов конвективного теплообмена подтверждена в работе [70].

Н. А. Анфимов и А. П. Швецов [7] предлагают для измерения кратковременных нестационарных тепловых потоков использовать зависимость диэлектрической постоянной керамических материалов от температуры. Конструктивно такой прибор представляет собой конденсатор — керамическую обложку с серебряными обложками. В качестве материала для конденсатора предлагается керамика СВТ (стронций—висмут—титанат). Толщину обложки выбирают такой, чтобы тепловые условия на ее «холодной» стороне не изменились за время действия теплового потока q . Инерционность изменения емкости в зависимости от q характеризуется толщиной серебряных обложки (около 0,3 мкм). Основные трудности практического осуществления этой конструкции заключаются, очевидно, в тарировке прибора, а главным образом, в выяснении возможности перевода записанной осциллографом зависимости емкости от времени в зависимость $t=f(\tau)$, постоянства коэффициента пропорциональности и т. д.

Для измерения кратковременных и неустановившихся тепловых потоков можно применять также некоторые приборы разработанные для стационарных режимов, с учетом инерционности их чувствительных элементов. Уменьшение инерционности обычно снижает чувствительность и точность устройства, поэтому необходимо искать способы разрешения этого противоречия. Один из способов — снижение инерционности и одновременное увеличение чувствительности датчика (тепловой) потока путем создания ячеистого батареального датчика. Несмотря на это, авторы книги построили прибор, описанный в гл. IV.

14. ТЕПЛОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ. РАДИОМЕТР С ВЕРТУШКОЙ

Теплообмен посредством лучеиспускания характерен тем, что тепловая энергия тела превращается в электромагнитную энергию излучаемых телом волн — лучистую энергию. Поглощаясь другим телом, лучистая энергия вновь превращается в тепловую.

Остановимся на способах измерения падающей лучистой энергии. Все эти измерения относятся к калорическим, т. е. позволяют определить интенсивность лучистой энергии на данном участке облучаемой поверхности с помощью того или иного теплового эффекта. Общим для этих способов является также сведение к минимуму собственного излучения и отражения приемника энергии, т. е. максимальная степень черноты и низкая температура.

Пытаясь экспериментально подтвердить наличие светового давления, предсказанного Максвеллом в 1873 г., Крук в опытах с вертушкой из алюминиевых пластинок, черненных с одной стороны, получил противоположный предсказанному эффект [93]. При откачивании воздуха из стеклянного баллона, в котором подвешивается вертушка, то определенное остаточное давление вертушка под действием облучения начинает вращаться так, что черненной стороной как бы уклоняется от облучения. Хотя из теории следовало, что чем большую степень черноты имеет поверхность, тем меньше на нее оказывает давление поток лучистой энергии. Лишь после того, как П. Н. Лебедев своими блестящими опытами подтвердил правильность теории Максвелла, представилась возможность правильно истолковать и использовать эффект, наблюдавшийся Круксом.

Причины этого вторичного эффекта состоят в следующем. При недостаточно тщательной эвакуации пространства, в котором расположена вертушка, в нем остается настолько большое число остаточных молекул газа, что лопасть вертушки непрерывно испытывает на себе с обеих сторон «бомбардировку» молекулами.

При отсутствии облучения черная и блестящая поверхности лопастей имеют одинаковую температуру. Молекулы остаточного газа после соударения с лопастью отскакивают в среднем с одинаковой скоростью как от черной, так и от блестящей сторон. Импульсы соударения оказываются взаимно равными — вертушка находится в равновесии.

При одностороннем облучении черные стороны лопастей оказываются более нагретыми, чем блестящие. Молекулы, соударяющиеся с более горячими черными поверхностями, отскакивают в среднем с большей скоростью, чем соударяющиеся с блестящими сторонами. Вследствие этого количество движения, получаемое от соударения на черных поверхностях превосходит количество движения, получаемое на блестящих. Величина суммарного момента количества движения оказывается достаточной, чтобы преодолеть эффект светового давления и трение в подшипнике.

Из изложенного следует, что при всестороннем облучении вертушка вращаться не будет. Если поместить вертушку внутри

печи с амбразурой, то она будет вращаться по направлению удаляющегося через амбразуру излучения в обратную сторону. Если вертушку повесить на упругую, например кварцевую, нить, то по величине угла поворота можно судить об интенсивности падающей лучистой энергии.

Николь в 1897 г. заменил металлические пластинки слюдяными. Благодаря этому разность температур на краях пластинок повысилась настолько, что таким прибором удалось измерять и излучение отдельных звезд.

Широкого распространения радиометр с вертушкой не получил из-за громоздкости и невысокой точности измерения, связанной с непостоянством давления остаточных газов.

15 МЕТОДЫ ТЕПЛОВОГО РАСШИРЕНИЯ

Мером интенсивности падающей лучистой энергии может служить тепловое расширение тела. Проф. В. А. Михельсон разработал и ввел в 1907 г. в практику [41] прибор для измерения потока солнечной радиации, основанный на принципе биметаллической пластинки. Нагреваясь, тонкая пластинка из металлов с различными коэффициентами расширения изгибается, перемещая кварцевую нить. Это перемещение нити измеряется с помощью микроскопа. Теорию радиометров с биметаллической пластиной разработал С. И. Савинов [75].

Тепловое расширение монометаллической пластинки использовано в стрелочном приборе Н. Н. Калитина [40] (рис. 16). На пластинке из материала с весьма малым коэффициентом расширения — инвара укрепляется посылка константана толщиной 0,03 и шириной 3 мм. Полоска эта изогнута. При нагревании облучением полоска прогибается и этот прогиб с помощью оттяжки и рычагов передается на ось со стрелкой. На оси укреплен пружинка, которая держит полосу в постоянном натяжении. Константановая полоска электрически изолирована от инваров, поэтому периодически можно производить тарировку прибора пропуская через чувствительный элемент электрического тока В. Д. Третьяков [86] построил прибор для непрерывной записи потока лучистой энергии — монометаллический актинограф.

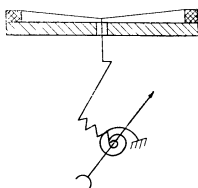


Рис. 16. Схема актинометра с монометаллической пластиной.

Тепловое расширение измеряется также приборами, основанными на измерении температуры приемника лучистой энергии с помощью жидкостных термометров.

Одна из таких конструкций была разработана Абботом в Смитсонском институте в США [41] в 1912 г и названа пиргелиометром с серебряным диском. Приемной частью прибора служит зачерненный серебряный диск, с одной стороны по радиусу диск имеет высверленное отверстие, в которое вставлена стальная пробирка, заполненная ртутью. В эту пробирку вставляется и полностью погружается в ртуть цилиндрический резервуар термометра. Термометр согнут под прямым углом так, что лучи, падающие на зачерненную поверхность диска, проходят параллельно его капилляру. Камера с серебряным диском вставляется в массивный теплоизолирующий цилиндр.

Построить абсолютный прибор, т. е. прибор, позволяющий непосредственно измерять лучистый поток в единицах тепловой энергии, на принципе изменения длины или объема весьма трудно. К таким приборам относится ледяной пиргелиометр Михельсона—Волошина [41]. Приемником лучистой энергии в этом приборе является пробирка с намороженным на нее снаружи льдом. Лучи солнца попадают внутрь пробирки через два маленьких, далеко расположенных друг от друга, отверстия — модель черного тела. Действие прибора основано на уменьшении объема льда при его таянии, что фиксируется специально сконструированным ртутным волюмометром.

Некоторые из описанных здесь приборов применяют для измерения лучистой энергии большой интенсивности. Например, пиргелиометр с серебряным диском был специально изготовлен [110] и применен для измерения направленной тепловой радиации интенсивностью до $4 \cdot 10^6 \text{ вт/м}^2$.

Приборы данной группы обладают сравнительно невысокой точностью и большой инерционностью.

16. ЭНТАЛЬПИЙНЫЙ МЕТОД

Энтальпийный метод положен в основу приборов, в которых под действием лучистой энергии повышается теплосодержание воды, непрерывно охлаждающей приемный элемент. Этот метод широко распространен в различных областях измерительной техники.

В США стандартным прибором для измерения солнечной радиации является так называемый водоструйный пиргелиометр [41]. Солнечные лучи, пройдя через диафрагму определенного размера, поглощаются внутренней поверхностью полого зачерненного металлического конуса, омываемого снаружи водой.

По повышению температуры воды, определяемому с помощью термометров сопротивления, при постоянном ее расходе получают интенсивность радиации в единицах тепловой энергии

Водяной калориметр применяется при исследовании радиационного теплообмена в камерах сгорания и топках паровых котлов [2, 80], в сталеплавильных [29] и стекловаренных печах [38], в энерготехнологических реакторах [73] и т. д.

Приведем конструкцию типичного прибора для определения интенсивности полусферического излучения по работе С. С. Финимова и др. [90]. Приемным элементом является металлическая пластинка диаметром 32 мм, черненная с одной стороны и охлаждаемая водой — с другой. От корпуса прибора пластинка отделена слоем изоляции. Водяной калориметр выполнен в виде змеевика. Разность температур воды на входе и выходе измеряется батареей из 10 дифференциальных термомпар. Температура приемного элемента измеряется заделанной в него термомпарой. С целью предотвращения тепловых потерь измерительная часть радиометра помещена в рубашку, охлаждаемую водой. Подогретая во избежание конденсации на поверхностях вода поступает в змеевик и охлаждающую рубашку.

Приборы подобного типа успешно применяются при потоках энергии примерно до 10^5 вт/м^2 . Для больших потоков лучистой энергии необходимы конструктивные видоизменения прибора. Глейзер [112] опубликовал конструкцию водяного калориметра для потоков до $1,6 \cdot 10^7 \text{ вт/м}^2$. Приемный элемент выполнен в виде полтой сферы диаметром 25 мм с охлаждаемой водой диафрагмой диаметром 9,5 мм. Конструкция была разработана для измерения тепловой радиации от дугových печей. Затем [103] с помощью вращающихся аттенуаторов — устройств, позволяющих в несколько раз снизить падающих на приемный элемент лучистый поток, верхний предел измеряемой интенсивности радиации был доведен до $(5-6) \cdot 10^7 \text{ вт/м}^2$.

17. МЕТОД БОЛОМЕТРА

Болометр — это прибор, приемной частью которого является термометр сопротивления или термистор.

Собственно болометром называется обычно прибор с приемником лучистой энергии в виде очень тонкой платиновой пластинки (толщина ее достигает долей микрометра), включенной как плечо в мостик Уитстона. При нагревании пластинки сопротивление ее растет и нуль-гальванометр моста фиксирует появление в диагонали тока, величина которого и служит мерой падающей энергии. Для увеличения чувствительности и предохранения от воздействия тепла окружающей среды пластинку помещают в вакуированный сосуд. Первым применил болометр Сванберг (1851) [93]. С помощью болометра можно измерять весьма малые падающие потоки, а также температуру талек и источников. Для измерения больших потоков приме-

пняются пленочные термометры сопротивления или термисторы (при условии их хорошего охлаждения)

Для измерения падающей энергии очень перспективно применение термисторов — полупроводниковых сопротивлений с очень большим температурным коэффициентом электрического сопротивления (4—6% на 1 град)

В. Н. Адрианов [1] предлагает помещать термистор (или головку термопары) в одном из фокусов эллипсоида отражения (рис 17) для измерения радиационной составляющей сложного теплообмена в камерах хранения. Через второй фокус эллипсоида проходит плоская стенка с отверстием в фокусе. Действие прибора основано на оптическом свойстве эллиптического зеркала, заключающемся в том, что любой луч, прошедший через один из фокусов зеркала, отразившись от его поверхности, пройдет через второй его фокус. Таким образом, предпологается, что все лучи, проходящие через отверстие диафрагмы, сфокусируются на поверхности приемника энергии. Для лучшего отражения поверхность эллипсоида полируется и покрывается слоем золота. Все устройство помещается в охлаждаемую водонепроницаемую камеру, внутрь зеркала подается осушенный воздух с температурой охлаждающей воды. Таким образом, внутренняя полость все время вентилируется сухим очищенным воздухом, что предотвращает попадание в прибор пыли и влаги. Из-за сложности изготовления прибора, особенно внутренней отражающей полости, его практическое применение ограничено.

Преимущество измерений по методу болометра в том, что можно изменять чувствительность в довольно широких пределах варьированием тока в плечах мостика. Однако такое изменение ограничено тем, что при большой силе тока начинает сказываться нагрев приемника за счет самого тока, что приводит к дрейфу нуля. Последнего, впрочем, можно избежать чисто электрическими приемами.

18 МЕТОД ТЕРМОСТОЛБИКА

Один или несколько (иногда до нескольких сотен) горячих спаев термоэлемента прикрепляют к тонкой черной пластинке, нагревание которой передается термоспаем. Холодные спаи

располагаются при этом вне зоны влияния излучения. Ответственно подобранном материале термоэлемента величина тока может служить мерой падающей энергии. Термостолбики могут выполняться в виде пластинок, полосок, звездочек. Приборы с чувствительным термоэлементом широко применяются при измерениях как падающей энергии, например, радиометры Бойко [56] и ЦКТИ [94], прибор для проверки опасности возгорания деревянных строений [123], так и температуры источника, например, в стандартных приборах типа «Рапир» (радиационный пирометр)

Для уменьшения инерционности термоспая изготавливают очень малой толщины методами осаждения в вакууме или методами гальванического покрытия [66]

Бойс в 1888 г. предложил конструкцию очень чувствительного и малоинерционного радиомикрометра [106], объединяя в одном приборе термостолбик и гальванометр. Термопара, горячий спай которой прикреплен к черному диску из тонкой медной фольги, подвешивалась на кварцевой нити между полюсами мощного магнита. Будучи замкнута медным проводником в петлю, термопара является рамкой такого своеобразного зеркального гальванометра

Многое для развития приборов с термостолбиками, и в частности радиомикрометра, сделал П. Н. Лебедев [93]. Чувствительность этих приборов он увеличивал в несколько раз помещая термоэлемент в вакуумированный баллон, что резко уменьшало конвективные потери тепла

Более простым и удобным методом повышения чувствительности и снижения инерционности термостолбиков является нагретая радиацией непосредственно горячих спаев, расположенных в воздухе. Холодные спаи при этом прикрепляются к большой массе теплопроводного материала. Благодаря незначительной массе такой термобатарей отсчет показаний производится через несколько секунд после начала облучения. На этом принципе построены некоторые приборы для измерения солнечной и рассеянной радиации, например, актинометр Горчинского и пирометр Яннишевского [41].

В несколько измененном виде этот метод использован в приборе для измерения тепловой радиации интенсивностью $(4 \div 400) \cdot 10^2$ вт/м², конструкция которого опубликована Гардоном [110] в 1953 г. Прибор (рис. 18) представляет собой массивный медный блок 2 с круглым отверстием, закрытый пластинкой из константовой фольги 1, припаянной по периферии к блоку. Энергия, воспринимаемая при облучении фольгой, растекается радиально к медному блоку, который можно представить как холодильник с постоянной температурой, а также теряется в окружающую среду. Горячий спай образован при

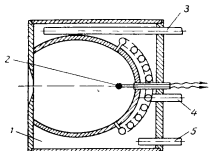


Рис. 17. Схема радиометра с эллипсоидальной камерой

1 — водонепроницаемая рубашка; 2 — сферический термометрический элемент; 3 — ввод охлаждающей воды; 4 — подача осушенного воздуха; 5 — выход охлаждающей воды

помощи тонкой медной проволоки 3, припаянной с обратной стороны в центре пластинки

При установившемся режиме на поверхности приемника температура распределяется так, как указано на рис. 18. Максимальная температура соответствует центру пластины. С помощью дифференциальной термопары, составленной из медной проволоки, константановой фольги и медного блока, измеряется разность температур

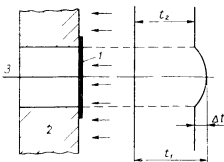


Рис. 18. Схема распределения температуры на поверхности приемника радиометра с круглой фольгой

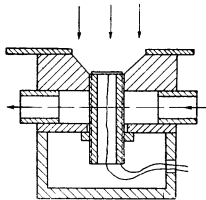


Рис. 19. Охлаждаемый радиометр с круглой фольгой

Δt , по величине которой судят об интенсивности падающей энергии. Прибор назван радиометром с круглой фольгой.

Исходя из некоторых упрощающих предположений (отсутствие потерь тепла — конвективных от фольги, кондуктивных через центральную медную проволочку, радиационных от всего датчика, расположение медной проволочки строго по центру пластинки и т. д.), Гардон аналитически получил связь между энергией лучистого потока q , разностью температур между центром и периферией пластинки Δt и размерами пластинки — радиусом R и толщиной S . При медно-константановом приемнике зависимость теплопроводности константана от температуры примерно компенсируется температурной же зависимостью термо-Э. д. с. пары медь—константан. Это позволило автору получить простое уравнение для чувствительности прибора

$$\frac{E}{q} = 4,36 \cdot 10^{-6} \frac{R^2}{S} \quad (24)$$

Варьируя размеры пластинки, можно получать радиометры с различной чувствительностью.

Автор предпринял попытку практически осуществить этот прибор. Из проволоки раскатывалась фольга толщиной до

0,02 мм и вырезался кружок диаметром 2—3 мм. Центральная проволочка диаметром около 0,02 мм припаивалась легкоплавким припоем. Датчики тарировались по пиррометру с серебряным диском. Чувствительность выполненных приборов оказалась порядка $(0,5 - 5) \cdot 10^{-5}$ мВ/вт/м² и отличалась от расчетной по формуле (25) на 30—65%.

Такое различие вполне естественно — это говорит о необходимости тарировки всех выполняемых радиометров с круглой фольгой. Значительно важнее, чтобы тарировочная характеристика не менялась со временем.

Постоянная времени радиометров оказалась невелика и составила примерно 0,1 сек. Рабочая температура не превышала 100°C.

Следует остановиться на работе [30] по определению теплопроводности окиси циркония при температурах свыше 1000°C, в которой измерялись локальные тепловые потоки, излучаемые образцом. С помощью радиометров с круглой фольгой удалось получить качественную картину распределения тепловых потоков по поверхности образца. Количественные суммарные измерения производились с помощью обычного термостолбика с холодильными спаями, охлаждаемыми проточной водой. Конструкция радиометра с круглой фольгой, применявшегося при исследовании локального излучения образца, показана на рис. 19 [10].

19. ИНЕРЦИОННЫЙ РАДИОМЕТР

Для измерения лучистых потоков до $2,5 \cdot 10^5$ вт/м² при температуре приемника до 600°C Моляр [121] предложил флюксметр, основанный на принципе инерционного тепломера, разработанного М. В. Кирпичевым и Г. М. Кондратьевым [82].

С помощью этого прибора определяется термическая инерция калориметра — металлического диска, воспринимающего лучистый поток на одну из граней. Если m — масса калориметра, c — удельная теплоемкость, S — воспринимающая поверхность, $\frac{dt}{dt}$ — производная от температуры диска по времени, то плотность поглощаемого потока q можно найти из соотношения

$$q = \frac{mc}{S} \cdot \frac{dt}{dt} \quad (25)$$

Чувствительным элементом прибора является диск из чистого золота диаметром 25 мм и толщиной 4 мм. Золото выбрано из условий наименьшего окисления и наибольшего отражения, что делает очень слабым теплообмен с окружающей средой, а также высокой теплопроводности, что позволяет принимать в каждый момент времени температуру одинаковой по всему диску. Облучаемая сторона диска покрывается черной краской, спо-

собою выдержат температуру 800°C , остальная поверхность его полируется.

Для измерения температуры диска в него заделана хромель-алюмелевая термопара. Диск с помощью трех тонких ($0,5$ мм) платинородиевых стержней укрепляется во впадине массивного блока из нихрома с зазором в $1,5$ мм.

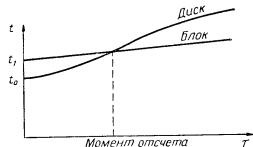


Рис 20 График изменения температуры частей инерционного радиометра во времени

Методика измерений заключается в следующем. Нагревают нихральный блок до предполагаемой температуры равновесия t_1 . К этому моменту температура приемника $t_0 < t_1$. Затем приемник подвергают облучению и регистрируют температуры приемника и блока двумя гальванометрами одинаковой чувствительности. Температура диска растет быстрее и через несколько секунд температурные кривые (рис. 20) пересекаются. В этот момент достигается равенство температур, и далее радиационный подогрев приемника расходуется только на повышение его температуры.

По касательной к температурной кривой приемника определяют $\frac{dt}{d\tau}$. Это значение, умноженное на $k = \frac{mc}{S}$, дает искомым поток q . Константа прибора k определяется линейной зависимостью от температуры, учитывающей изменение теплоемкости и коэффициент расширения золота. По расчетам при 0°C $k = 0,241$ и при 600°C $k = 0,250$.

Точность измерений этим прибором, по предположению Мюллера, $5-10\%$.

20. МЕТОД РАСПЛАВЛЕНИЯ КРАСКИ

Для измерения мощных направленных радиационных потоков Томас и Смит [138] предложили прибор весьма простой конструкции. Тонкая пластинка покрывается слоем специально подобранной краски. Пластинка экспонируется в течение определенного времени потоком лучистой энергии с помощью диа-

фрагмы, закрываемой крышкой. Полученное за время экспозиции тепло расходуется главным образом на подогрев и расплавление краски. Авторы нашли зависимость между количеством падающей энергии и диаметром кружка расплавившейся краски. Таким образом, необходимо измерить две величины: время экспозиции и диаметр кружка. Метод этот, конечно, не может претендовать на высокую точность, но в производственных условиях при измерениях стабильных во времени потоков может оказаться весьма полезным.

21. МЕТОД КОНДУКТИВНОГО ТЕПЛОВОГО ПОТОКА

При исследованиях и эксплуатации топочных устройств, камер сгорания и т. п. широко распространены калориметры для измерения падающего радиационного потока с организованным отводом тепла через твердое тело, у которого фиксируется падение температуры на определенную толщину. Конструкция одного из таких калориметров — термозондов показана на рис. 21 [45]. Медный или стальной блок цилиндрической формы диаметром 34 мм с одного торца подвергается облучению, с другого — охлаждению проточной водой. По оси блока на расстоянии одна от другой 17 мм для меди и 6 мм для стали через боковые сверления закладывались хромель-алюмелевые термопары с диаметром электродов $0,2$ мм. Запись показаний термопар производилась с помощью потенциометра ЭПП-09. Для определения теплового потока использовались значения теплопроводности материала блока, определенные из опыта, т. е. прибор использовался как абсолютный. Измеренные тепловые потоки для горизонтальной циклонной камеры сгорания с воздушным охлаждением достигали $0,5 \cdot 10^6$ вт/м². Доля конвективного теплообмена по измерениям равна примерно 10% этой величины. Во время опытов поверхность приемника покрывалась плотным налетом черного цвета, температура поверхности поднималась до 450°C . При этом существенно возрастало обратное излучение калориметра, что не могло не увеличить погрешности измерений.

В некоторых конструкциях подобных термозондов для упрощения измерений выводы термоэлектродов делались непосредственно с использованием для дифференциальной термопары материала приемного блока. Для измерения результирующих потоков (разности между падающим и отраженным потоками) в мартеновских печах в Восточном н.-и. институте топливно-использования (ВНИИТ) был разработан термозонд с двумя направленными в противоположные стороны приемниками [94]. Материал приемников — жароупорная сталь, термоэлектродов — константан; размеры $d \times h = 34 \times 15$ мм. Термозонды необходимо было периодически градуировать по водяному кало-

риметру в специальной печи из за изменения со временем степени черноты поверхности приемника и других характеристик прибора

В последующей работе ВНИИТа [54] предложено использовать радиометр с одним таким приемным блоком для измерения температуры внутренней поверхности свода марганцевой печи

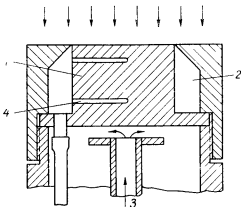


Рис 21 Радиометр с кондуктивным датчиком температуры воды

1 — блок 2 — воздушный зазор, 3 — подводящий водопровод 4 — вывод для термометра

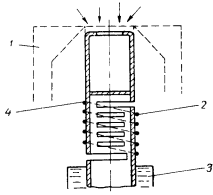


Рис 22 Радиационный термометр Института автоматики Госплана УССР

1 — ограждающий кожух, 2 — охлаждающая жидкость, 3 — охлаждающая вода, 4 — горючие газы

Для тарировки по температуре в качестве эталона использован валс радиационный пирометр.

Оригинальный радиационный термометр разработан в Институте автоматики Госплана УССР И. Л. Семкиным, В. С. Костом Грызовым и О. Л. Цыганковым и описан в работе [78].

Частью прибора (рис. 22), воспринимающей падающий поток, является модель абсолютно черного тела. Основная доля воспринимаемого теплового потока за счет теплопроводности передается через промежуточное тело охлаждающей воде. Промежуточное тело спроектировано так, что линии теплового потока приобретают S-образную форму, что достигается при помощи специальных прорезей, изображенных на чертеже. Благодаря этому в средней части поток направляется перпендикулярно оси прибора. На среднюю часть промежуточного тела наматывается батарея дифференциальных терморезисторов, сигнал которой пропорционален величине теплового потока, пронизывающего среднюю часть промежуточного тела. Для увеличения сигнала батареи терморезисторов промежуточное тело рассеяно системой до-

полнительных прорезей, способствующих выделению линии теплового потока

Чувствительность такого прибора очень высока, однако ему должны быть присущи недостатки приборов с термостолбками: вследствие нелинейности зависимости побочных потерь от температуры показания прибора и точность его измерения зависят от температуры охлаждающей воды и омывающего воздуха

Для устранения этих недостатков необходимо свести к минимуму промежуточные ответвления теплового потока либо поддерживать постоянство температуры охлаждающей воды. Последнее в промышленных условиях, для которых разработан прибор, невозможно

Промежуточные же потери, по-видимому, можно свести к терпимому минимуму, поместив между приемной и отводящей частями батарейный датчик теплового потока спирального типа, который описывается ниже. В нем побочные потери, а следовательно, и их нелинейности практически сведены к нулю

22 ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТЕПЛОМЕР

При нагревании некоторых кристаллов на их поверхности появляются электрические заряды (пирозлектричество). Т. Перлс и Б. Мэйтс [128, 120] нашли, что некоторые поляризованные керамики (титанат бария, цирконат-титанат свинца) способны генерировать ток, прямо пропорциональный поглощаемой тепловой мощности.

$$i = \frac{\gamma q}{cd\rho}, \quad (26)$$

где i — сила тока, q — тепловой поток, c — удельная теплоемкость керамики, ρ и d — соответственно плотность и толщина керамики, γ — пирозлектрический коэффициент, и сконструировали прибор.

В этом приборе чувствительным элементом служит керамический диск диаметром 100 и толщиной около 5 мм (рис. 23), покрытый на обеих гранях тонкой серебряной пленкой, играющей роль съемных электродов. Весь элемент помещен в корпус между слоями стекловаты, предохраняющей керамику от ударов и вибрации. Грань, обращенная к источнику радиации, покрывалась черной глифталевой эмалью со степенью черноты $0,9 \pm 0,05$.

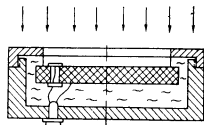


Рис 23 Пирозлектрический термометр

Б. Мэйт и Т. Перле [120] применили описанные тепловые для определения теплового воздействия на окружающую среду при запуске ракетных установок типа «Поларис». Они указывают, что пирозлектрический коэффициент γ зависит от интенсивности поглощаемой энергии (растет с ее увеличением), но это изменение в какой-то мере компенсируется уменьшением поглощаемой энергии за счет обратной радиации приемного элемента. Они полагают, что чувствительность прибора при этом остается постоянной в пределах $\pm 10\%$. Максимальная рабочая температура датчиков из титаната бария — 90°C , из цирконата титаната свинца — 300°C .

Пирозлектрические теплотомеры безусловно должны найти применение в измерительной практике, однако оно будет ограниченным, так же как у пьезозлектрических манометров.

23. КОМПЕНСАЦИОННЫЙ МЕТОД

В 1890 г шведский астроном К. Ангстрем предложил и создал абсолютный прибор, работающий по компенсационному принципу. Прибор этот сразу же получил всеобщее признание

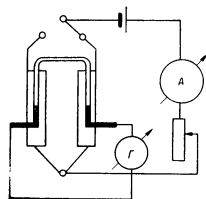


Рис. 24. Схема пиргелометра Ангстрема

и до настоящего времени считается лучшим среди актинометрических приборов.

Основу пиргелометра Ангстрема (рис. 24) составляют две очень тонкие манганниновые полоски, обычно длиной 20, шириной 2 мм. Фронтальная поверхность пластинок тщательно чернится. Одна из пластинок экспонируется под измеряемой радиацией, другая в это время нагревается за счет пропускания через нее электрического тока так, чтобы их температуры выровнялись. При этом тепло, полученное за счет

радиации одной из полосок, будет эквивалентно энергии, выделяемой за счет электрического нагрева второй

При известном сопротивлении полосок и величине пропускаемого тока легко можно определить затрачиваемую на компенсационный обогрев электрическую мощность.

Эбонитовый блок, несущий на себе полоски со всеми сопряженными деталями, располагается обычно в бронзовом трубчатом корпусе, закрытом спереди крышкой с двумя щелями-амбразурами, против которых расположены полоски. Непосредственно за крышкой перед полосками находится заслонка, сблокиро-

ванная с переключателем таким образом, что электрическому обогреву подвергается затененная полоска. Нагрев регулируется реостатом так, чтобы ток в цепи дифференциальной термопары, контролирующей разность температур полосок, стал равен нулю. Цепь дифференциальной термопары замыкается через специальный гальванометр.

Дифференциальная термопара состоит из петлевой константановой перемычки, соединяющей между собой две тонкие медные полоски, приклеенные шеллаком на тонкой бумаге к манганиновым полоскам. Медные полоски способствуют осреднению и выравниванию температур, а также исполняют функции термоэлектродов дифференциальной термопары.

Электрические измерения и контроль режима компенсации могут производиться с очень высокой точностью. Наиболее трудно проконтролировать с достаточной точностью геометрические размеры полосок и степень черноты передней стороны полосок. Эти причины и являются основным трудно устранимым источником погрешности измерений, примерно 2,5—3% измеряемой величины при средних потоках. Измерение малых потоков связано с большими погрешностями.

Ангстрем построил целую серию приборов компенсационного типа. Для измерения солнечной радиации — пиргелометр, измерения рассеянной радиации неба — пиранометр, измерения интенсивности земного излучения — пиргеометр. Все эти приборы отличаются высокой точностью, поэтому принцип компенсационного обогрева стал применяться и в других областях науки и техники для измерения направленных и полусферических потоков различной интенсивности.

Радиометр, построенный на принципе компенсационного пиргелометра на лучистые потоки до $20\,000\text{ вт/м}^2$, был создан авторами книги в 1956 г [21, 22].

В качестве приемных элементов изготавливались манганниновые пластинки толщиной 0,05—0,08 мм, шириной 10 и высотой 30—50 мм. Для установки на радиометр отбирались две наиболее близкие по размерам пластинки. Обе пластинки крепились на одинаковых медных вилках, через зубья которых они питались током.

Пластинки вместе с вилками укреплялись на изоляторах (текстолитовых втулках) в массивном медном блоке так, чтобы лицевые стороны были видны из амбразур, расположенных с разных сторон блока, с зазором между пластинкой и блоком в 0,1 мм. Таким образом, когда одна из пластинок подвергалась облучению, другая находилась в тени. Отвод тепла от обеих пластинок производился за счет свободной конвекции воздуха, поднимавшегося возле каждой из сторон пластинок — лицевой и тыльной, для чего в медном блоке были сделаны каналы. Голочки дифференциальной хромель-алюмелевой термопары из

прохода воды, с одной стороны он закрыт водоохлаждаемым конусом, с другой — крышкой с диафрагмой. Охлаждаемая вода подается из напорного бачка с постоянным уровнем, перед камерами она размешивается и разделяется к обеим камерам. На выходе вода попадает в стеклянные трубки с заделанными внутри спаями дифференциальной четырехспайной термопары. Таким образом, балансировка радиационного и электрического нагрева производится по температуре воды на выходе. Интересно отметить, что в этой работе производились испытания радиометра на идентичность камер с помощью попеременного измерения потока обеими камерами. По-видимому, полученные значения тепловых потоков существенно разнились, так как при подсчетах интенсивности теплового излучения приходилось использовать среднеквадратичное из значений, полученных при измерениях отдельными камерами.

Соответственно, при каждом измерении необходимо проводить двойную работу. С учетом большой инерционности приемных камер на отдельное измерение (по очереди обеими камерами) приходится затрачивать не менее 15 мин. Предполагается, что общая ошибка не будет превышать $\pm 2\%$.

24. УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ТЕПЛОМЕРЫ

Некоторые из описанных выше методов измерения локальных тепловых потоков, когда основным является одна из форм теплообмена — конвекция, теплопроводность или тепловое излучение, — имеют между собой много общего и могут применяться и при измерении других форм теплообмена.

Так, например, керамические блоки с поверхностью резистивной пленкой-термометром использовались Хамблом и др. [115] при измерениях как радиационных, так и конвективных потоков, а также в случаях, когда доли радиации и конвекции были равноправны.

С помощью водяных калориметров делались попытки разделить долю конвективного потока, когда преобладает радиационный, например, по методу двух калориметров, поверхности которых имеют разную степень черноты [50, 90]. Принцип пироэлектрического термометра, описанного выше, предполагается использовать также и при измерениях конвективных потоков (случай охлаждения теплоносителя).

Р. Гардон в работе [111] описывает датчик конвективных тепловых потоков, идентичный радиометру с круглой фольгой. При этом при охлаждении теплоносителя вид температурной кривой будет таким же, как и на рис. 18, при нагревании — кривизна температурной кривой изменит знак.

Конструкция эта удобна в том отношении, что ее сравнительно легко заделать заподлицо с поверхностью теплоотдача. Од-

нако корректное применение ее ограничивается небольшими потоками тепла, так как при больших потоках разность температур центра и краев фольги будет искажать профиль температур в пограничном слое, что неизбежно приведет к погрешностям измерений и деформации поля тепловых потоков.

Р. Гардон применил тепломеры с круглой фольгой для изучения теплопередачи между плоской поверхностью и струями воздуха, ударяющими в нее. Горячая плита с тепломером перемещалась механически перед рядом перпендикулярных к ней сопел. Запись сигнала тепломера производилась непрерывно с помощью самописца. Гардон указывает, что в этих опытах выдерживалось условие малости Δt центр—край фольги по сравнению с Δt плита—воздух — движущей силой теплопередачи.

Между приборами, в которых осуществлен метод дополнительной стенки (конвекция) и приборами, в которых осуществлен метод кондуктивного теплового потока (тепловое излучение) нет принципиального различия. В рекламном сообщении [130] предлагается радиометр, представляющий собой тепломер — дополнительную стенку [131], обдуваемую воздухом от малого вентилятора. Для случая полусферического излучения предлагается теньевую сторону закрывать двойным экраном, для радиометра сальдо-потоков обе стороны стенки покрываются одинаковым чернением. Однако универсальный прибор для исследования местного теплообмена в любой из его форм можно создать, пожалуй, из всех описанных в данной главе способов — лишь на принципе дополнительной стенки. Некоторые методы, пригодные, скажем, для измерения конвекции или теплового излучения, по тем или иным причинам совершенно непригодны для исследования распространения тепла в твердом теле.

Метод дополнительной стенки (или кондуктивного теплового потока) характерен тем, что измерению подлежит тепловой поток, проходящий теплопроводностью через стенку датчика. Если выдержать условия расположения стенки по изотермической поверхности исследуемого тела без искажения изотерм при этом, то таким прибором можно пользоваться для изучения задач внешнего теплообмена или внутренней теплопроводности.

Однако описанные выше тепломеры, работающие на принципе дополнительной стенки — модификации «пояса Шмидта» — имеют сравнительно большие габариты и большое тепловое сопротивление, что препятствует их применению при локальном исследовании различных форм теплообмена и в особенности теплопроводности.

Единственный прибор, который может быть положен в основу разработки универсального измерителя локальных тепловых потоков, как нам представляется — это датчик теплового потока, разработанный авторами книги. Размеры его малы и даль-

более их уменьшение почти не ограничено. Тепловое сопротивление датчика невелико и при необходимости может быть уменьшено за счет применения самых теплопроводных металлов или увеличено, например, в последних конструкциях батарейных датчиков путем подбора коэффициента заполнения кожуха датчика металлом элементарных датчиков. В случае необходимости датчику можно придавать форму, которую имеют изо термы в исследуемом теле.

Датчики теплового потока уже нашли применение при измерении локальных тепловых потоков, подводимых к телу (или отводимых от него) тепловым излучением и конвекцией, а также распространяющихся в теле теплопроводностью истинной или эффективной (пористые тела, многослойная композиция с газовыми прослойками).

Одна из немногих областей теплообмена, где трудно применять датчики теплового потока — это распространение тепла в пористом теле, сопровождающееся неэнтальпическим движением жидкости в порах тела. Вообще, при наличии массообмена в теле датчик, видимо, всегда будет препятствовать таковому.

ГЛАВА III

ПРИБОРЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ И ДЛЯ ИХ АБСОЛЮТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ

25. ИСТОЧНИКИ КОНТРОЛИРУЕМЫХ МОЩНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ

Потребность в источниках контролируемых потоков достаточной мощности в различных областях науки и техники велика. Такие источники необходимы при определении теплофизических констант материалов, градуировке различных измерительных устройств, моделировании граничных условий теплообмена, в частности, при определении влияния теплового потока на поведение материалов.

Дело обстоит сравнительно просто при необходимости организации небольших тепловых потоков. В этом случае наиболее простым является кондуктивный способ подведения тепла к исследуемой поверхности от контролируемого нормализованного источника тепла (обычно электрического) посредством теплопроводности. Способ этот неизбежно обладает большой инерционностью, а требуемая направленность потока обычно достигается увеличением инерционности и уменьшением эффектив-

ности. Емкость промежуточных теплопроводов ограничивает возможное изменение подводимых потоков во времени.

При исследовании условий возвращения космического летательного аппарата в атмосферу величины потоков, согласно Бонину и Прайсу [14], могут достигнуть при первой космической скорости $4 \cdot 10^7$ вт/м². При определенных условиях ускоренного возвращения на Землю на встречном курсе величины эти могут быть на несколько порядков выше. Приведенные цифры говорят об уровне потоков, создание которых в лабораторных условиях может оказаться актуальным.

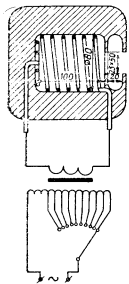


Рис. 27 Муфельный излучатель

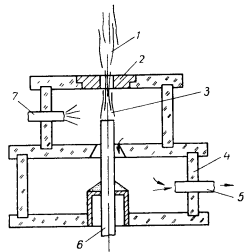


Рис. 28 Схема плазменного torchа

1 — плазма 2 — катод; 3 — водная «рубка» 4 — кожух; 5 — отвод пыли

Кроме упоминаемого в гл. I кондуктивного способа создания контролируемых тепловых потоков, возможна организация требуемых тепловых (в дополнение к температурным) условий посредством конвекции и радиации. Требование контролируемости подвода тепловой энергии практически исключает комбинирование видов обмена.

В этом отношении существенными преимуществами обладает подвод за счет радиации. Вопрос об источнике лучистой энергии решается обычно в каждом частном случае.

При умеренных потоках находят широкое применение инфракрасные излучатели электродлампового типа, используемые например, при ускоренной сушке окрашенных поверхностей на автомобильных заводах. Интенсивность излучаемой энергии за-

висит от температуры и степени черноты излучающей поверхности, поэтому, казалось бы, электрические лампы накаливания с температурой нити порядка 3000°С и высокой степенью черноты нити должны получить самое широкое распространение как источники теплового излучения. Они обладают также такими преимуществами как малая инерционность, возможность точного регулирования потока и надежность в работе. Однако поверхность нити относительно сечения баллона столь мала что даже для группы ламп, расположенных в шахматном порядке, падающая энергия на расстоянии 250 мм от нити накала не превышает 10^4 вт/м² [56]. Примерно такими же потоками ограничено применение различного типа электронагревателей с металлическими греющими элементами.

Авторы книги, изменив конструкцию муфельной печи (рис 27) для радиационной тарировки датчиков теплового потока, получили величину падающей энергии $2 \cdot 10^4$ вт/м², равномерную на площадке диаметром 50 мм. Нагревательный элемент был изготовлен из нихромового прута диаметром 5 мм и длиной 120 см [22]. Максимальная температура нагревателя составляла 200°С. Применение платины, а также силита позволяет поднять температурный уровень до 1400—1500°С, что соответствует тепловым потокам у отверстия муфеля $(0,5-1) \cdot 10^6$ вт/м².

Для моделирования аэродинамического нагрева тепловым излучением от группы силитовых трубок [121] получены падающие потоки интенсивностью до $2,5 \cdot 10^5$ вт/м². Дальнейшее повышение этой величины производят с помощью вакуумных графитовых печей, а для окислительной атмосферы — дуговых печей. С помощью угольных дуговых печей удается повысить падающий поток до $1,6 \cdot 10^6$ и даже $5 \cdot 10^6$ вт/м² [112, 103].

Однако работа таких печей характеризуется малой стабильностью дуги — флуктуация интенсивности падающего потока обычно превышает $\pm 10\%$. При использовании специальных кожухов для электродов и спектрально чистых углей неравномерность интенсивности излучения дуги можно снизить до 5% [58]. Можно также заключить столб дуги в трубку, охлаждаемую водой. Естественно, что такие дуги нельзя использовать в качестве источника контролируемого теплового потока.

С помощью охлаждаемой водой дуги были созданы генераторы плазмы, которые являются источниками мощных конвективных тепловых потоков. Бонни и Прайс [14] исследовали по ведению различных материалов (скорость прогресса и уноса) при подводе к ним энергии, соответствующей аэродинамическому нагреву тела, входящих в атмосферу со скоростью $(1-3) \times 10^3$ м/сек. Схема плазменного генератора приведена на рис 28. Водяная «трубка» создается за счет центробежных сил (тангенциальный подвод). Плазма истекает из отверстия в катоде со скоростью около 900 м/сек и температурой до 14 000°К. При

установке испытуемого образца вертикально на 10 см выше отверстия в катоде он воспринимал тепловые потоки конвекцией, равные $3 \cdot 10^7$ вт/м².

Получил распространение также подвод энергии к поверхности с помощью электронной бомбардировки, что широко используется в электровакуумной технологии. Нагреваемая поверхность служит анодом, ее размещают в вакууме на некотором расстоянии от источника электронов — катода. Приобретенную в электростатическом поле этого своеобразного диода кинетическую энергию электроны выделяют при торможении в наружном, очень тонком (до 5 мкм) слое анода в виде тепловой энергии, которая отводится теплопроводностью в материале анода.

Метод этот не имеет принципиальных ограничений по величине создаваемого потока. Практически в случае необходимости в современных условиях можно было бы создать потоки порядка 10^{10} вт/м².

Известна установка ЭНИНа по подводу энергии электронной бомбардировки к поверхности теплообмена при кипении жидкостей [69]. Максимальная интенсивность теплового потока при изучении критической тепловой нагрузки составляла $15 \cdot 10^6$ вт/м².

Е. В. Кудряцев и др. [52] сконструировали электронный калориметр для определения теплофизических констант электропроводных материалов. Роль анода в этом калориметре играл испытуемый образец. Метод позволяет сравнительно просто задавать тепловые потоки в различных функциях времени соответствующим изменением тока эмиссии катода, разностью потенциалов между катодом и анодом и, наконец, напряжением на сетке.

В последнее время электронный обогрев начал применяться также при получении сверхчистых материалов с помощью вакуумной переплавки [76]. Возможности этого метода подвода тепловой энергии ограничены необходимостью создания глубокого вакуума (до 10^{-7} мм рт. ст.), что приводит как к сложности аппаратуры и громоздкости опытов, так и к невозможности сочетания воздействия тепловых нагрузок и той или иной атмосферы.

Наша работа в области источников контролируемого теплового потока проводится по пути конструирования малоинерционных излучателей тепловых потоков, имеющих электрический нагреватель сопротивления. В настоящей главе приводится опыт создания и эксплуатации радиационных печей с интенсивностью излучения до 10^6 вт/м² и высокой контролируемостью (стабильностью) потока, а также пути к дальнейшему повышению уровня излучаемой энергии.

При разработке приборов для измерения локальных тепло-вых потоков большой интенсивности мы столкнулись с потребностью в источнике направленного контролируемого теплового потока с интенсивностью падающей энергии в окислительной среде то $1 \cdot 10^6 \text{ вт/м}^2$. Для получения таких потоков было необходимо создать нагреватель, выдерживающий температуру до 2000°C и способный развить достаточную мощность. В качестве материала излучателя был выбран графит, имеющий хорошие электрические и механические свойства и температуростойкость. Для защиты от воздействия окислительной среды графитный нагреватель должен помещаться в герметичный кожух с незначительной продувкой его неагрессивным газом. Радиационный поток направляется при этом наружу через теплопрозрачное окно в кожухе. Однако мы не располагали данными о теплопрозрачности различных материалов при высоких тепловых потоках и температурах, поэтому было решено создать излучатель для несколько меньших температур, но с возможностью длительной работы нагревателя в обычной атмосфере. При этом одновременно с основными работами по исследованию датчиков теплового потока необходимо было выяснить поведение широко доступных теплопрозрачных материалов при облучении их мощными тепловыми потоками.

Для защиты графита от окисления решено было покрывать его фигурный нагреватель тонким газоплотным слоем карбида кремния по технологии, разработанной Г. Г. Гнесиным. При пребывании такого нагревательного элемента в окислительной атмосфере выгорание углерода и кремния из карбида кремния приводит к образованию тонкой, очень стойкой защитной пленки из окиси кремния — кварца. В местах повреждения пленки процесс окисления возобновляется с регенерацией защитной пленки.

Согласно геометрическим и энергетическим расчетам и технологическим требованиям для получения направленных равномерных по каждому нормальному сечению потоков нагреватель должен иметь форму полусферической чаши с концентрацией энергии в направлении, перпендикулярном к срезу чаши. Для получения равномерного падающего потока на площадке диаметром d диаметр чаши составляет около $3d$.

Была разработана специальная технология изготовления нагревательных элементов. Из электродного графита вытачивается на токарном станке чаша диаметром 160 и толщиной стенки 10 — 12 мм. Затем чаша с помощью фрезы и несложных приспособлений разрезается на фрезерном или сверлильном станке так, что суммарная длина последовательно расположен-

ных участков нагревателя составляет около 2 м, а сечение — около 1 см^2 . На концах нагревателя при вытачивании оставляются два штуцера, в которых нарезается резьба для токопроводящих латунных nipples. Готовый элемент (рис. 29) с небольшой перемычкой между штуцерами для сохранения жесткости системы равномерно покрывается карбидом кремния по всей поверхности, за исключением нижней части резьбы, где слой карбида кремния делается более тонким для лучшего кон-

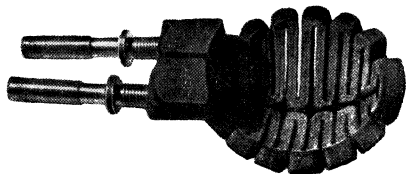


Рис. 29 Нагревательный элемент с токоподводящими nipples

такта с nippleм. Затем перемычка удаляется на корундовом круге и в штуцеры вворачиваются охлаждаемые водой nipples. Надежность контакта nipples с нагревателем обеспечивается дополнительно заливкой зазоров в резьбовом соединении оловом с предварительным лужением концов nipples.

Нагревательный элемент в холодном состоянии имеет сопротивление около $0,1$ ом, поэтому для питания нужен понижающий трансформатор. При прогреве элемента сопротивление его незначительно падает, вызывая соответствующее увеличение тока.

Отражательная изоляция. При выборе тепловой изоляции излучателя, которая снижала бы температуру с 1600 — 2000 до 20 — 30°C , были произведены сравнительные расчеты различных ее типов. Ни один из существующих видов обмазок, засыпок и т. п. не удовлетворил требованиям малой инерционности, высокого к. п. д. (отношение тепла, излучаемого в нужном направлении, к подводимой энергии) и оперативности в работе. Достаточно сказать, что составная изоляция из огнестойкой замазки, шамота и совелита при допустимых теплопотерях (до 10^3 вт/м^2) должна иметь толщину около $0,5$ м. Выход на стационарный режим при такой изоляции происходил бы в течение 10 ч. Поэтому был выбран новый тип изоляции — холодная отражающая изоляция. Красномедные стенки ее были покрыты изнутри тонким (3 мкм) слоем золота с коэффици-

ентом отражения около 98% (в настоящее время авторами проводятся работы по изготовлению и испытанию серебряных и индиевых зеркал). Охлаждаются стенки проточной водой, снаружи они хромируются и полируются.

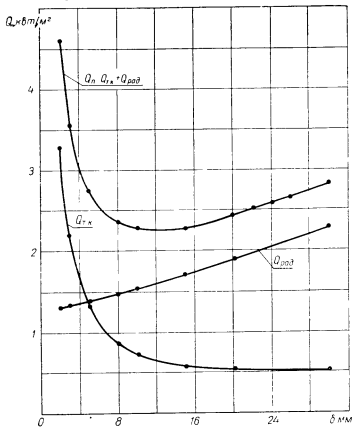


Рис 30 График для определения оптимального зазора между нагревательным элементом и стенкой

Конструктивно изоляция оформляется в виде полусферы и передней стенки с амбразурой в центре. Для выбора оптимального зазора между нагревательным элементом и стенкой изоляции была рассчитана теплопередача в шаровой прослойке с учетом радиации и теплопроводности. Поскольку произведение критериев $Gg \cdot Pr$ в данном случае оказалось достаточно малым (меньше 10^4 при зазоре в 30 мм), передача тепла конвекцией учитывалась в виде эквивалентного коэффициента теплопроводности [63]. Из графика (рис. 30) видно, что оптимальный воздушный зазор между сферами нагревателя и изоляции состав-

ляет 12 мм. Этот размер и был принят при конструировании прибора [15].

Эксплуатация прибора. Комбинация графитового нагревательного элемента и безынерционной отражательной изоляции позволяет выходить на стационарный режим в течение 5—7 мин. Время выхода на режим определяется исключительно массивностью графитового нагревателя (толщина 10—12 мм), так как инерционность отражательной изоляции представляет собой величину более чем четвертого порядка малости по сравнению с нагревателем.

Как видно из рис. 31, нагревательный элемент монтируется на текстолитовой доске с помощью токоподводящих шпильки. На этой же доске вертикально устанавливаются передняя стенка и задняя полусфера. Опорами для них служат штуцеры, через которые подводится охлаждающая вода. Через вырез в полусфере проходят болты нагревателя с зазором 0,5—1 мм, и передняя стенка касается полусферы во всей зоне высокой температуры.

Нагреватель питается от сварочного трансформатора, который позволяет получить во вторичной обмотке ток до 600 а. Ток плавно регулируется с помощью дросселя.

Поскольку объем охлаждающей системы очень мал, применяется блокировка нагрева печи с датчиком в виде манометра с контактом. На рис. 32 показана схема блокировки, а также электрического питания прибора.

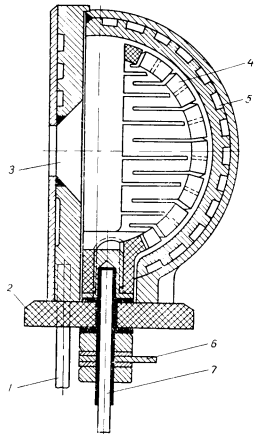


Рис 31 Нагревательный элемент

1 — амбразура; 2 — текстолитовая доска; 3 — каналы для воды; 4 — нагревательный элемент; 5 — каналы для воды; 6 — подвод электроэнергии; 7 — подвод воды для охлаждения контактов.

Стабильность излучения очень высока и зависит лишь от колебаний напряжения в городской сети. Старение нагревательных элементов невелико — за 200 ч эксплуатации одного элемента повышение сопротивления элемента не превышает 8%

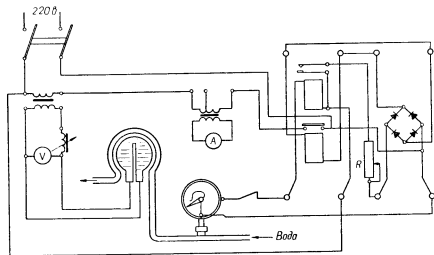


Рис. 32 Схема блокировки и питания излучателя.

Балансовые испытания прибора показали, что при амбразуре диаметром 50 мм к. п. д. излучателя составляет около 25% [25]. При увеличении амбразуры до 100 мм к. п. д. прибора увеличивается до 60%, однако появляется неравномерность потоков у краев амбразуры.

Излучатель уже длительное время эксплуатируется при температурах нагревателя 1400—1600°C. Максимальная температура в опытах составила 1700°C. Температура плавления защитной пленки из окиси кремния равна 1713°C. Однако уже при температурах свыше 1680°C защитные свойства пленки начинают резко ухудшаться, видимо, за счет диффузии кислорода. В связи с этим при повышении температуры нагревателя свыше 1650°C срок службы элемента начинает резко сокращаться.

Характерная особенность, заслуживающая упоминания, состоит в ограниченности срока службы элемента при сравнительно низких температурах. Вследствие различия коэффициентов температурного расширения графита и покрывающего силита последний со звоном трескается при снижении температуры элемента до 900—800°C. Если при последующих нагревах температура элемента не превышает 1300°C, количество трещин

при каждом последующем пуске увеличивается и через образовавшиеся от предыдущих пусков трещины начинает выгорать графит. Нагревательный элемент выходит из строя через 5—10 пусков.

Если же довести температуру элемента до 1450—1500°C, то, видимо, вследствие диффузии происходит «залечивание» трещин и элемент приобретает способность к длительной эксплуатации в течение 300—500 ч с количеством пусков, превышающим 100. Количество часов непрерывной работы не проверялось и, по-видимому, существенно превышает названную цифру.

Из исследовавшихся теплопрозрачных материалов наилучшим для изготовления окон излучателя считается галит — каменная соль (NaCl) из Артемовского месторождения. Пластиной галита толщиной 1 мм была закрыта амбразура излучателя в течение 30 ч высокотемпературных опытов, охлаждалась она за счет естественной конвекции воздуха. Изменения теплопрозрачности материала, а также оптических и механических свойств обнаружено не было. К сожалению, не удалось получить температурные характеристики, так как измерить температуру пластины в таких опытах было очень трудно.

Описанный излучатель можно рекомендовать для решения вопросов лабораторного исследования плавки металлов, испытания образцов при нагреве и др. Вертикальное исполнение печи удобно для тарировки датчиков тепловых потоков и высокотемпературных термометров (излучатель обладает всеми свойствами высокотемпературного термостата и модели абсолютно черного тела), а также для обжига образцов, подвергающихся механическим испытаниям. Небольшие конструктивные доделки позволяют придавать печи наклонное или горизонтальное положение, заполнять пространство печи тем или иным газом. При накрывании навески расплавленного материала печью можно моделировать процессы в печах с излучающим сводом и т. п.

27. КОМПЕНСАЦИОННЫЙ РАДИОМЕТР

В гл II упоминалось о разработанном нами компенсационном радиометре для измерения падающей энергии излучения интенсивностью до $2 \cdot 10^4$ вт/м².

При разработке датчиков более мощных тепловых потоков потребовался соответствующий абсолютный прибор. Оказалось возможным, сохранив преимущества компенсационного метода измерения (высокую чувствительность и точность, а также локальность измерений как в пространстве, так и во времени), повысить верхний предел измерений до $3 \cdot 10^5$ вт/м² за счет принудительного охлаждения теплоприемников [26, 27]

В основе прибора, головка которого показана на рис. 33, сохранен принцип компенсационного пиррелометра Ангстрема. Чувствительными элементами служат тонкие пластины из сплава с высоким электрическим сопротивлением. Края пластины зажаты в токоподводящие шины, для того чтобы было из них можно было нагревать за счет пропускания электрического тока. Пластины расположены с разных сторон головки прибора так, что когда одна из них облучается, другая находится в тени.

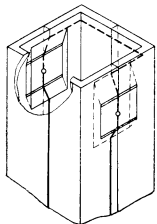


Рис. 33. Головка компенсационного радиометра

В средней части каждой пластины закреплены спай дифференциальной терморпары, измеряющей разность температур пластин. Измеряемый лучистый поток направляется на одну из пластин и обогревает ее. Пластина, расположенная в тени, обогревается за счет пропускания через нее электрического тока.

Тепло, поступившее на пластины в виде лучистой и электрической энергии, отводится от внутренних поверхностей пластин за счет форсированной конвекции воздуха, подаваемого в канал, образованный шинами, со скоростью до 100 м/сек.

При полной симметричности и идентичности условий крепления пластин и отвода от них тепла нулевое показание дифференциальной терморпары соответствует равенству подводимых к пластинам энергий. Таким образом, количество поглощенной облучаемой пластиной энергии может быть определено по количеству электроэнергии, расходуемой на компенсационный нагрев пластины, расположенной в тени.

Конструкция радиометра показана на рис. 34.

Собственно головка радиометра образуется тремя медными шинами 2 специального профиля. В верхней части шин образуют канал квадратного сечения, постепенно переходящий в нижней части к круглому сечению. Такая конфигурация шин обусловлена тем, что при проверке работы радиометра необходимо менять местами облучаемую и теневую пластинки. Благодаря круглому сечению нижней части шин, такая перемена местами пластин легко осуществляется путем поворота всей головки вокруг оси симметрии.

Внутреннее сечение квадратного канала в верхней части головки 22×22 мм, толщина шин 3 мм. Снаружи шины полированы и позолочены с целью уменьшения нагрева их от источ-

ника радиации (коэффициент поглощения наружной поверхности шин около 2%).

Места контакта шин по образующей канала уплотнены изолирующей слюдяной прокладкой толщиной 0,5 мм. Хотя шины и не подвержены существенному нагреву, прокладку следует ставить на термостойчивом клее типа ФГ-9, так как сама прокладка имеет степень черноты, близкую к единице, и может нагреваться с внешней стороны до 500—600°С. В верхней части в шинах прорезаны окна 1 для радиометрических пластин.

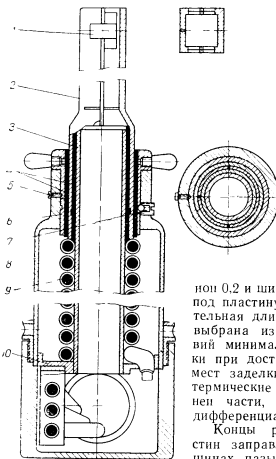


Рис. 34. Компенсационный радиометр

Раднометрические пластины представляют собой нихромовые полосы толщиной 0,2 и шириной 8 мм. Длина окна под пластину равна 16 мм (относительная длина пластины 80 мм) и выбрана из компромиссных условий минимальных размеров головки при достаточно малом влиянии мест заделки концов пластины на термические условия работы средней части, где крепятся головки дифференциальной терморпары.

Концы радиометрических пластин заправлены в прорезанные в шинах пазы и тщательно впаиваются. Излишки припоя на пластинках могут привести к неидентичности условий и поэтому снимаются сначала механически, а затем электролитическим растворением. Наружные стороны пластин всегда покрываются тонким слоем трехпроцентного раствора голландской сажки в поливиниловом термостонком лаке.

В нижней части медные шины зажимаются между внутренней и наружной цилиндрическими втулками 3 и 6. На внутреннюю втулку 3 напрессована изоляционная эбонитовая втулка

В основе прибора, головка которого показана на рис. 33, сохранен принцип компенсационного пиргелиометра Ангстрема. Чувствительными элементами служат тонкие пластины из сплава с высоким электрическим сопротивлением. Края пластин зажаты в токоподводящие шины, для того чтобы лобью из них можно было нагревать за счет пропускания электрического тока. Пластины расположены с разных сторон головки прибора так, что когда одна из них облучается, другая находится в тени.

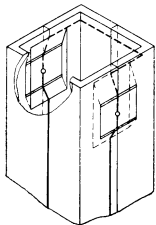


Рис. 33 Готовка компенсационного радиометра

В средней части каждой пластины закреплены спай дифференциальной терморпары, измеряющей разность температур пластин. Измеряемый лучистый поток направляется на одну из пластин и обогревает ее. Пластина, расположенная в тени, обогревается за счет пропускания через нее электрического тока.

Тепло, поступившее на пластины в виде лучистой и электрической энергии, отводится от внутренних поверхностей пластин за счет форсированной конвекции воздуха, подаваемого в канал, образованный шинами, со скоростью до 100 м/сек.

При полной симметричности и идентичности условий крепления пластин и отвода от них тепла нулевое показание дифференциальной терморпары соответствует равенству подводимых к пластинам энергий. Таким образом, количество поглощенной облучаемой пластиной энергии может быть определено по количеству электроэнергии, расходуемой на компенсационный нагрев пластины, расположенной в тени.

Конструкция радиометра показана на рис. 34.

Собственно головка радиометра образуется тремя медными шинами 2 специального профиля. В верхней части шины образуют канал квадратного сечения, постепенно переходящий в нижней части к круглому сечению. Такая конфигурация шин обусловлена тем, что при проверке работы радиометра необходимо менять местами облучаемую и теневую пластинки. Благодаря круглому сечению нижней части шин, такая перемена местами пластин легко осуществляется путем поворота вент головки вокруг оси симметрии.

Внутреннее сечение квадратного канала в верхней части головки 22×22 мм, толщина шин 3 мм. Снаружи шины полированы и позолочены с целью уменьшения нагрева их от источ-

ника радиации (коэффициент поглощения наружной поверхности шин около 2%).

Места контакта шин по образующей канала уплотнены изолирующей слюдяной прокладкой толщиной 0,5 мм. Хотя шины и не подвержены существенному нагре-

ву, прокладку следует ставить на термоустойчивом клее типа ФГ-9, так как сама прокладка имеет степень черноты, близкую к единице, и может нагреваться с внешней стороны до 500—600°С. В верхней части в шинах прорезаны окна 1 для радиометрических пластин.

Радиометрические пластины представляют собой нихромовые полосы толщи-

ной 0,2 и шириной 8 мм. Длина окна под пластину равна 16 мм (относительная длина пластины 80 мм) и выбрана из компромиссных условий минимальных размеров головки при достаточно малом влиянии мест заделки концов пластины на термические условия работы средней части, где крепятся головки дифференциальной терморпары.

Концы радиометрических пластин заправлены в прорезанные в шинах пазы и тщательно впаиваются. Излишки припоя на пластинах могут привести к неидентичности условий и поэтому снимаются сначала

механически, а затем электролитическим растворением. Наружные стороны пластин дважды покрываются тонким слоем трехпроцентного раствора голландской сажи в поливиниловом термостойком лаке.

В нижней части медные шины зажимаются между внутренней и наружной цилиндрическими втулками 3 и 6. На внутреннюю втулку 3 напрессована изоляционная эбонитовая втулка

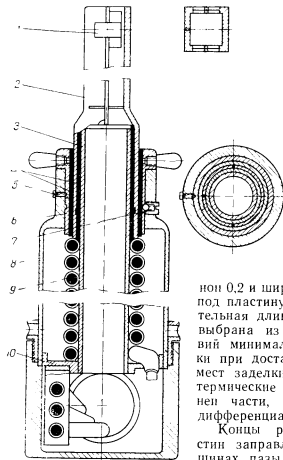


Рис. 34 Компенсационный радиометр

4, на котором предусмотрен выступ, входящий во впадину в цилиндрической части шпни.

В наружную обойму 6 запрессована вторая изоляционная втулка В сборе шпни и втулки 3, 4, 6 образуют единую систему, способную поворачиваться вокруг собственной оси симметрии на верхней опоре в несущем стакане 8 и нижней опоре в центрирующем диске 10.

Винт 5 предназначен для исключения возможных продольных перемещений и ограничения поворота обоймой 6 Шариковый фиксатор 7 фиксирует поворотную систему деталей 3, 4 6 в положениях, отличающихся друг от друга поворотом на $\frac{\pi}{2}$ рад каждое.

Несущий стакан 8 прижимается к нижней части корпуса при помощи накидной гайки. Радиометр в сборе устанавливается на кронштейне-координатнике.

Подвод электроэнергии для питания компенсационного нагрева теневой пластины осуществляется посредством трех медных проводов большого сечения 9, которые внутри стакана 8 выложены по винтовой линии таким образом, что каждый из проводов делает не менее двух витков. Такая прокладка гибких проводов позволяет осуществлять непрерывное питание головок радиометра за счет только упругих деформаций проводов, обходясь без крайне нежелательных в данном случае щеточных переходов. Трехпроводная система электропитания позволяет осуществить любую комбинацию нагрева радиометрических пластин

Радиометрическая пластина — наиболее ответственный элемент прибора. В связи с этим все конструктивные размеры собственно пластины и сопрягаемых деталей были выбраны после обстоятельных исследований.

В принципе при условии строгой идентичности в изготовлении пластин единственным источником погрешности метода может служить лишь то обстоятельство, что обгорев измерительной пластины происходит через поверхность, в то время как компенсационная пластина нагревается электрическим током во всем объеме. Отводится тепло в основном с внутренней обдуваемой стороны пластины. При этом тепловой поток измерительной пластины преодолевает цепочку термических сопротивлений: чернящее покрытие, полное сопротивление пластины, теплоотдачу на внутренней обдуваемой поверхности

Тепловой поток компенсационной пластины преодолевает лишь около половины сопротивления пластины и теплоотдачу на обдуваемой поверхности. Для получения достаточной идентичности условий работы пластин термическое сопротивление чернящего покрытия и собственно пластины должно быть мало по сравнению с сопротивлением конвективного отвода тепла

Экспериментальные определения показали, что при максимальном обдуве коэффициент теплоотдачи с внутренней стороны $\alpha = 780 \text{ вт/м}^2 \cdot \text{град}$

Изложенное выше требование к термическим сопротивлениям можно записать следующим образом.

$$\frac{\bar{\epsilon}_{\text{ч.п.}}}{\lambda_{\text{ч.п.}}} - \frac{1}{2} \frac{\bar{\epsilon}_{\text{п.п.}}}{\gamma_{\text{п.п.}}} \leq \frac{k_{\text{н.п.}}}{\sigma}, \quad (3.1)$$

где $k_{\text{н.п.}}$ — допустимый коэффициент неидентичности условию работы пластин радиометра, $\bar{\epsilon}_{\text{ч.п.}}$ и $\lambda_{\text{ч.п.}}$ — соответственно толщина и коэффициент теплопроводности чернящего покрытия, $\bar{\epsilon}_{\text{п.п.}}$ и $\lambda_{\text{п.п.}}$ — толщина и коэффициент теплопроводности пластины.

Экспериментально было установлено, что по достижении толщины чернящего покрытия 0,01 мм дальнейшее ее увеличение не дает прироста степеней черноты покрытия. Более тонкие пленки покрытия оказываются в какой-то мере теплопрозрачными.

Если принять допустимой величину коэффициента $k_{\text{н.п.}} = 0,005$ и толщину чернящего покрытия 0,01 мм при $\lambda_{\text{ч.п.}} = 2 \text{ вт/м} \cdot \text{град}$, то приведенному выше условию удовлетворяют никромовые пластины, толщина которых не превышает 0,5 мм. Это относится к идеально изготовленному радиометру со строго симметричными пластинами. При практическом осуществлении прибора, естественно, неизбежны некоторые отклонения, приводящие к нарушению симметрии. В связи с этим конструктивные элементы прибора необходимо выбирать таким образом, чтобы влияние допущенных погрешностей на проводимые измерения было минимальным.

Наиболее существенным может оказаться влияние несимметричности заделки концов пластины, которое сказывается в том, что вблизи заделки существенная часть энергии за счет теплопроводности отводится в токоподводящую шину. Поскольку длина пластины ограничена, влияние заделки концов простирается до места крепления головок дифференциальной термомпары. При этом возможная неидентичность крепления концов пластины приведет к фиктивному небалансу при измерении. Ниже приведено исследование области влияния заделок на температурное поле пластины.

В физической постановке задачи пластина представляет собой равномерно обогреваемый стержень с отводом тепла с поверхности и за счет теплопроводности — в заделки. Дифференциальное уравнение теплопроводности для такого случая имеет следующий вид.

$$\frac{d}{dx} \left(F_1 \frac{dt}{dx} \right) + W - Pxt = 0, \quad (3.2)$$

где x — продольная координата, F — площадь поперечного сечения пластины; λ — теплопроводность пластины; t — текущая избыточная температура, W — энергия, подводимая к единице длины за счет радиационного или электрического нагрева, P — часть периметра стержня, с которой снимается тепло с интенсивностью теплоотдачи α

При единичной ширине пластины и отводе тепла с одной стороны $F=\delta$, а $P=1$ Решение уравнения (32) при граничных условиях

$$\begin{aligned} x=0 \text{ и } x=l, \quad t=0, \\ x = \frac{l}{2}, \quad \frac{dt}{dx} = 0, \end{aligned}$$

приведенное к безразмерным единицам, имеет следующий вид:

$$t = \frac{W}{\alpha} \left[1 - \frac{1}{e^{Bi}} \left(e^{\sqrt{Bi} \bar{x}} + e^{-\sqrt{Bi}(1-\bar{x})} \right) \right], \quad (33)$$

где Bi — приведенный критерий Био; $\bar{x} = \frac{x}{l}$.

Для середины пластины, где закрепляются головки дифференциальной термопары ($\bar{x}=0,5$), температура является функцией только Bi .

$$t = \frac{W}{\alpha} [1 - f(Bi)]. \quad (34)$$

Функция $f(Bi)$ представляет собой отношение температуры в середине рассматриваемой пластины к температуре в бесконечно длинной пластине, работающей в аналогичных условиях, на большом расстоянии от места заделки, где заделка уже не оказывает никакого влияния на температурное поле. Таким образом, функция $f(Bi)$ определяет степень влияния заделки на температуру в середине пластины радиометра.

На рис. 35 приведен график зависимости функции $f(Bi)$ от величины Bi . Из графика видно, что при $Bi > 20$ влияние заделки не превышает 20%, т. е. возможные из-за несимметричности заделки погрешности уменьшаются более чем в пять раз.

На основании графика (рис. 35) и согласно конструктивным и технологическим возможностям значение Bi было выбрано равным 25, что при выбранных размерах пластины ($l=16$ мм) соответствует толщине пластины 0,2 мм.

Источником погрешностей измерений может быть также неидентичность в условиях закрепления головок дифференциальной термопары. Дифференциальные термопары изготавливаются из хромель-алюмеля толщиной 0,15 мм. Сварка головок термопар производится в тигле, заполненном графитным порошком. После отжига место спая зачищается и термоэлектроды выт-

являются так, чтобы один из них представлял собой прямое продолжение второго. Затем место спая прокатывается на вальцах с доведением толщины термоэлектродов и спая до 0,03 мм.

В процессе прокатки термоэлектроды необходимо несколько раз отжигать. Полученная таким образом плоская дифференциальная термопара при помощи специальной струбишки наклеивается на радиометрическую пластину. При наклеивании спая термопар и термоэлектроды обклеиваются с обеих сторон слюдяными чешуйками толщиной около 0,01 мм. Склеивание производится на термостойких лаках ФГ-9 или ФЭБС-Л-302.

Практически невозможно подобрать очень тонкие (0,01 мм) слюдяные пластинки одинаковой толщины. Поэтому температуры головок термопары могут отличаться от температуры пластины неодинаково, что неизбежно повлечет к погрешности измерений. В таких условиях термическое сопротивление дополнительной трехслойной стенки (слода — термопара — слюда), накладываемой на пластину радиометра, должно быть мало по сравнению с термическим сопротивлением при отдаче тепла от пластины к охлаждающему потоку. Кроме того, тепло может рассеиваться от спая по термоэлектроду, вызывая неравномерное снижение температуры спаев.

Анализ термических сопротивлений дополнительной трехслойной стенки приводит к следующей формуле

$$Bi = \alpha \sum \frac{\delta_i}{k_i} \leq k_{in} n, \quad (35)$$

где δ_i и k_i — соответственно толщина и коэффициент теплопроводности слоев дополнительной стенки.

При принятии технологии наклеивания при помощи специальной струбишки термическим сопротивлением слоев клея толщина их может быть оценена в доли микрона) можно предположить. Коэффициент неидентичности $k_{in} n$, видимо, не должен превышать 5%, т. е. $k_{in} n \leq 0,05$.

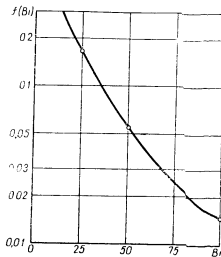


Рис. 35. График зависимости функции $f(Bi)$ от величины Bi

Для уменьшения оттока тепла через термоэлектроды последние необходимо располагать по изотермической линии, т. е. в поперечном направлении относительно пластины радиометра. В этом случае к плоскому термоэлектроду полностью применимы все соображения, на основании которых получены уравнение (3.3) и график (рис 35), с той лишь разницей, что под длиной термоэлектрода l в данном случае необходимо понимать ширину пластины радиометра.

Всем изложенным требованиям удовлетворяют выбранная толщина ленты термоэлектродов $\delta_{\text{тэ}} = 0,03$ мм и толщина изолирующих слюдяных пластин, равная 0,01 мм.

При конструировании прибора в соответствии с приведенными выше соображениями, связанными с неидентичностью, и тщательном изготовлении прибора компенсация радиационной энергии, поглощенной измерительной пластиной, может быть произведена с достаточно высокой точностью.

Следует, однако, иметь в виду, что черненная поверхность пластины воспринимает не всю энергию радиационного потока. Степень черноты покрытия определяется с точностью до 2% ($\epsilon = 0,96 \div 0,98$), что необходимо учитывать при определении абсолютной величины радиационного потока.

При определении радиационных потоков, поглощаемых какой-либо поверхностью, черненной таким же образом, как и пластины радиометра, погрешность измерений не превышает 1—3%.

Компенсационная мощность определяется путем измерения силы тока и падения напряжения на компенсационной пластине. Сила тока измеряется по падению напряжения на последовательно включенных калиброванных шунтах. Съем падения напряжения производится в непосредственной близости к местам впаива пластин. Падение напряжения измеряется компенсационным методом при помощи потенциометра Р-307 с нуль-гальванометром М-195/2.

Правомочность съема потенциалов с медных шин была проверена опытами с одновременным электрообогревом пластин и снятием падения напряжения при помощи специальных электродов. Рабочим элементом щупа являются две острые каленые иглы, прокалывающие покрытие на радиометрических пластинах. Расстояние между острыми игл фиксировано и измерено с точностью до 0,01 мм. В проверочных опытах иглы щупов контактировали с металлом радиометрических пластин в точках, симметричных относительно спая терморпары, по линии, параллельной длинной стороне пластины. Измеренная мощность при этом относилась к единице поверхности пластины, равной bl' , где b — ширина пластины, l' — расстояние между иглами щупа.

В обоих случаях измерения съёмными щупами и стационарными медными проводниками расхождение в удельной мощности, выделяемой при балансе по дифференциальной терморпаре, не превышало 1%. Поэтому тепловой поток q определяется по формуле

$$q = \frac{W}{f}, \quad (3.6)$$

где W — мощность электрического нагрева компенсационной пластины, σt ; $f = bl$ или $f = bl'$ — площадь пластины, м^2 .

Пластины радиометра питаются постоянным током от выпрямительной установки (рис. 36). Для сглаживания мгновенных значений выпрямленного тока выпрямляющие элементы разбиты на три секции, питаемые от индивидуальных трансформаторов.

В каждую секцию включены соответственно активное, емкостное или индуктивное сопротивление, подобранные таким образом, чтобы обеспечить углы сдвига фаз около $\frac{\pi}{3}$ рад, что дает наибольшую равномерность тока на выходе.

Плавное регулирование силы тока через пластины производится путем изменения напряжения переменного тока, для чего были переконструированы автотрансформаторы типа ПАТ-0,35.

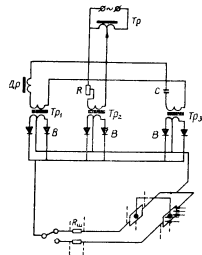


Рис 36 Электрическая схема компенсационного радиометра

28. ИНЕРЦИОННЫЙ РАДИОМЕТР ДЛЯ БОЛЬШИХ ПОТОКОВ

Несмотря на тщательность расчета, изготовления и проверки компенсационного радиометра, при градуировке датчиков теплового потока желательно было иметь измерения падающих потоков чистой энергии также другим абсолютным прибором. Кроме цели дублировки измерений, при создании нового прибора мы руководствовались необходимостью проверки работы датчиков при отводе от них тепла теплопроводностью к массивному телосток (при градуировке с компенсационным прибором теплоотвод осуществлялся принудительным потоком воздуха). Поэтому было решено построить прибор инерционного типа [24].

Инерционный калориметр представляет собой массивный цилиндр, один торец которого подвергается облучению, другой

Торец и боковая поверхность — тщательно изолированы. Благодаря такому устройству цилиндр можно рассматривать как часть плоско-параллельной пластины. Тепловой поток определяется по разности показаний термопар, расположенных по оси блока на разном расстоянии от облучаемой поверхности [59], или по приросту показаний термопары, расположенной в центре блока, за определенный промежуток времени. Последний способ измерения дублировался показаниями термопары, спай которой располагался на поверхности, отстоящей от обогреваемого

торца на расстоянии $x = \frac{\sqrt{3}}{3} h$, где h — высота цилиндра.

Согласно выводам [52, § 5], временное изменение температуры этой поверхности тождественно изменению среднеинтегральной температуры всего тела при постоянном тепловом потоке к поверхности.

Мерный цилиндр был выполнен из красной меди, размеры его 50×50 мм. Термопары хромель-алюмелевые с толщиной электродов 0,15 мм располагались в блоке с точностью заделки спаев около 0,5 мм и впайвались на олове. В центре обогреваемого торца заподлицо с поверхностью заделывался контрольный датчик теплового потока. В связи с тем, что термическое сопротивление блока невелико, точность заделки спаев термопар особой роли не играет.

Регистрация температуры (всего было заделано шесть термопар) блока производится с помощью 12-точечного электронного потенциометра ЭПП-09 с временем цикла измерений 5 сек, а для отдельных точек — с помощью одноточечного потенциометра непрерывной записи типа КВТ1/ЕН.

Борьба с оттоком тепла от блока производится следующим образом. Боковая поверхность и задний торец блока тщательно полируются и хромируются. Вокруг блока размещается алюминиевая рюмка с зазором в 1 мм и толщиной стенки менее 1 мм. От воздействия облучения рюмка скрыта кольцевым выступом на блоке высотой 2 мм. Внутренняя и наружная поверхности рюмки полированы. С помощью шести стальных струн рюмка укрепляется на кольце диаметром 180 мм (рис. 37). Медный блок подвешивается в центре рюмки с помощью одной иглы в дынышке рюмки и трех струн, идущих к тому же кольцу. Электроды термопар и датчика отводятся через ножку рюмки.

Предварительно были использованы оба указанные выше способа подсчета теплового потока по показаниям одной или двух термопар, давшие хорошее совпадение результатов. Преобладающим малым оказалось различие в тепловых потоках, подсчитанных по показаниям термопар, спаи которых распола-

гались на поверхностях на расстоянии $x_1 = \frac{\sqrt{3}}{3} h$ и $x_2 = \frac{h}{2}$

от обогреваемого торца. В дальнейшем для определения повышения внутренней энергии блока мы пользовались показаниями центральной термопары. При конструировании прибора не удалось обеспечить оптимальный воздушный зазор между блоком и стенкой рюмки, так как это привело бы к чрезмерному увели-

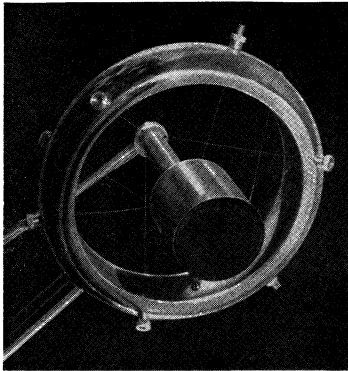


Рис. 37 Инерционный радиометр

чению заплечика на блоке, скрывающего от облучения рюмку, и потерю тепла от этого заплечика. Поэтому отвод тепла через воздушную прослойку и от передней грани блока первоначально измерялся при каждом режиме теплового потока. Для этой цели наряду с кривой роста температуры блока записывалась кривая его охлаждения после внезапного прекращения облучения. Для определения тепловых потерь касательную к температурной кривой проводили в точке, соответствующей температуре, при которой определялся тепловой поток нагретым (рис. 38). Удельный тепловой поток определялся из соотношения

$$q = \frac{C}{F} (t'_1 + t'_2), \quad (37)$$

где C — теплоемкость блока $C=Gc$; G — вес блока; c — удельная теплоемкость (определялась по литературным данным). F — воспринимающая поверхность; t_1' — производная температуры по времени в точке t_1 ; t_2' — абсолютная величина производной в точке t_2 ; $t_1 = t_2$.

В опытах доля теплотеря составила не более 10% воспринимаемой энергии, т. е.

$$|t_2'| \leq 0,1t_1'$$

Для взаимной проверки инерционный радиометр располагался на координатнике компенсационного радиометра таким образом, что простым поворотом координатника можно было менять прибор для измерения потока радиационной печи.

Положение каждого из измеряющих поток приборов фиксировалось на координатнике: идентичность расположения приемных плоскостей приборов при измерении контролировалась с высокой точностью до

запуска печи. Фиксация обеспечивала неизменность расстояния от печи при рабочем режиме печи и переменах измерительных приборов. Приемные поверхности приборов одинаково чернились для обеспечения идентичности степеней черноты.

Расхождение в полученных значениях удельного теплового потока при различных режимах составило 2—5%. Эту же величину можно представить как погрешность измерений инерционным радиометром, поэтому совпадение результатов вполне удовлетворительно.

Приборы компенсационного и инерционного типов могут применяться при измерениях тепловых потоков соответственно до $3 \cdot 10^5$ и $6 \cdot 10^5$ вт/м² и такой предел можно увеличить в два-три раза при несущественных изменениях в конструкции и системе отсчета и измерения

Чувствительность этих приборов при максимальном потоке можно оценить в 100 и 500 вт/м²

ГЛАВА IV

ДАТЧИКИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА

29. ВОПРОСЫ ГОМОГЕННОСТИ. ИСТОЧНИКИ ПОМЕХ

Одиночный датчик теплового потока представляет собой своеобразную сплюснутую дифференциальную терпару, промежуточный термоэлектрод которой служит дополнительной

стенкой (рис 39). При расположении датчика по изотермической поверхности исследуемого тела на гранях промежуточного слоя возникает разность температур, пропорциональная тепловою потоку. Эта разность температур благодаря контакту с крайними электродами вызывает соответствующую э. д. с., которая с помощью съемных проводников подается на усилительный, коммутирующий или измерительный прибор. Малая толщина и высокая теплопроводность промежуточного термоэлектродо обуславливают низкую энергетическую эффективность такого «термоэлектрогенератора». Между тем температура, в которой работает датчик, не зависит от величины пронизывающего датчик потока и в отдельных случаях может существенно отличаться от температуры среды, в которой находятся измерительные и усилительные приборы. При этом провода, передающие сигнал датчика, оказывающиеся под разностью температур, величина которой на несколько порядков превосходит разность температур на среднем слое датчика. В этом существенное отличие условий работы датчика от условий, в которых работают обычные терпары, в отношении гомогенности материала термоэлектродов. Поэтому нам пришлось с особым вниманием отнестись к вопросам гомогенности материалов датчика и в особенности токосъемных проводников, а также к другим источникам возмущений. Для этого необходимо было обратиться к работам, проводившимся на заре исследования термоэлектрических явлений и в современном учении о термоэлектричестве с его тенденциями максимального выхода по току почти не упоминаемым. Приведем краткую сводку их по капитальному курсу физики О. Д. Хвольсона [93].

В 1823 г. Зеебек открыл, что закон Вольта (в замкнутой цепи, состоящей только из проводников первого рода, сумма э. д. с. равна нулю) перестает быть верным, когда спаян, т. е. места соединения разнородных частей цепи, находятся при различных температурах. Этим было положено начало учению о термоэлектричестве.

Пельтье в 1834 г. нашел, что явление Зеебека обратимо, т. е. при пропускании электрического тока через место спая двух различных металлов он охлаждается или нагревается в зависимости от направления тока, охлаждение наступает при течи тока в том же направлении, что и термоток при нагревании спая. Ленц с помощью этого эффекта заморозил воду, пропуская

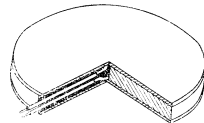


Рис 39 Одиночный датчик теплового потока

ток через спай висмута и сурьмы, таким образом построил образ термозлектрохолодильника.

Комбинируя между собой различные металлы, Зеебек нашел, что их можно расположить в термозлектрический ряд, и чем дальше друг от друга в этом ряду расположены металлы, тем большую термо-э. д. с. будут они иметь в паре между собой. Сплавы также могут быть расположены в этом ряду, однако не между теми металлами, из которых они составлены. Наличие малых примесей в металле может поменять его место в термозлектрическом ряду. Термозлектрические явления могут наблюдаться и в цепи, составленной из одного химически чистого проводника.

Томсон теоретически и экспериментально показал (1856), что в неравномерно нагретом однородном проводнике под влиянием электрического тока происходит перераспределение температуры проводника. К этому времени уже был известен так называемый закон Магнуса (1851 г.), что в замкнутой цепи, состоящей из одного металла, $E=0$, каково бы ни было распределение температур вдоль цепи. Иначе говоря, в цепи из двух металлов E зависит только от t_1 и t_2 и вовсе не зависит от распределения температур вдоль этих металлов. Однако E может возникать в цепи химически однородной, части которой отличаются друг от друга только физическим состоянием. Уже Зеебеку было известно, что закаленные металлы отрицательнее теплее металлов мягких. Положение металла в термозлектрическом ряду может меняться также под влиянием чисто механических воздействий (растяжения, сжатия и т. п.). Бахметьев проделал простой опыт, завязав на проволоке узел и, нагревая место возле узла, получил при этом термозлектрический ток.

Помещение металла в магнитное поле, протекание по нему электрического тока также меняют его место в ряду.

Наконец, соприкосновение одинаковых металлов, находящихся при различных температурах, может вызвать термозлектрические токи.

В 1918 г. появилось исследование Бенедикса, который пришел к выводу, что закон Магнуса неверен и что в однородной цепи E не равно нулю, т. е. ток появляется, когда в этой цепи находятся несимметрично распределенные падения температуры.

В своей работе по определению однородности материала мы не ставили задачи проверки выводов Бенедикса, так как не располагали химически чистыми материалами. Мы подходили к этой работе с позиции возможности использования того или иного материала для токосъемных проводников датчиков теплового потока, вдоль которых в различных практических случаях работы датчиков возможны значительные перепады температур.

Изготовленный датчик тарировался в паре с усилителем или с гальванометром. Затем входные клеммы того же прибора

закорачивались достаточно длинным куском материала съемных проводников. Проволока прогревалась электрической печью в различных местах, при этом фиксировались показания прибора. Выяснилось, например, что прогрев различных образцов алюминиевой и хромелевой проволоки до 200—300°C с перемещением нагревателя вдоль проволоки привел к показаниям прибора, по величине соответствующим тепловым потокам на хромель-алюмелевом датчике толщиной 0,5 мм порядка $(3-5) \times 10^3$ вт/м² [22]. В связи с этим пришлось прекратить испытания уже изготовленных хромель-алюмелевых датчиков и отказаться от их дальнейшего изготовления только из-за отсутствия высокоомогенных хромеля и алюминия. Неприемлемыми для изготовления съемных проводников одиночных датчиков оказались также проволоки из других сплавов (константан, копель).

При проверке на однородность медных стандартных проводников сигнал от несимметричного нагрева до 100°C соответствовал показаниям медно-константанового датчика толщиной 1 мм при прохождении теплового потока порядка 20—30 вт/м². Во время этих испытаний легко регистрировалось влияние магнитного поля Земли при передвижении пелли закорачивающей прибор. Поэтому в дальнейшем опыты по проверке на однородность (а также испытания датчиков) производились с бифилярно скрученными проволочками. Указанный выше сигнал для меди составляет тысячные доли процента от шкалы прибора по тепловому потоку, поэтому его следует принимать во внимание при измерениях одиночными датчиками лишь малых тепловых потоков. Кроме меди, успешно прошли проверку на однородность только платина (99,99%) и серебро (99,9%).

С материалом промежуточного термозлемента дело обстоит значительно проще в силу самих условий работы. В связи с тем, что требования к точности измерений температур при помощи терморпар значительно выше, чем при измерениях тепловых потоков, материалы, по однородности приемлемые для терморпар, подходят для промежуточного слоя датчика.

При эксплуатации датчиков следует остерегаться перечисленных выше причин возникновения паразитных термо-э. д. с. механических напряжений, отжига части проводника, мощных магнитных полей и т. п. Если же измерения в таких условиях неизбежны, то необходимо всякий раз проводить специальное исследование природы возникновения помех и предельных во-можных их величин.

30. СПОСОБЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДАТЧИКОВ

При проведении исследования по созданию одиночных датчиков были испытаны следующие способы изготовления датчиков: гальваническое покрытие; конденсирование металлов в ва-

кууме; электронское покрытие; металлизация расплыением (шоопирование); пайка; различные виды сварки.

Ниже кратко описаны все испытываемые способы, включая и те, которые оказались малоперспективными.

Гальваническое покрытие хорошо зарекомендовало себя как весьма прочное и надежное. Поэтому изготовление датчика путем последовательного наложения гальванических покрытий не вызывает технологических возражений. Практические приемы получения покрытий, рецептура электролитов и режимы осаждения подробно изложены в работах [10, 31]. Единственным недостатком гальванического покрытия является то, что сравнительно легко могут быть получены только покрытия из чистых металлов.

Получить покрытия из сплавов удается лишь в отдельных случаях, а для таких сплавов, как копель или алюмель, вообще невозможно. Те же металлы и сплавы, которые легко осаждаются гальванически, обладают сравнительно большой теплопроводностью и малой термо-э. д. с. Поэтому чисто гальванические датчики можно рекомендовать только для измерения больших тепловых потоков. Комбинированные датчики с гальваническим покрытием крайних слоев на штампованную заготовку среднего слоя применялись нами весьма успешно.

Проведенная попытка получения гальваническим способом промежуточного покрытия из полупроводниковых материалов FeS_2 и NiS не увенчалась успехом вследствие низкой механической прочности этих покрытий.

Конденсирование металлов в вакууме находит довольно широкое применение в технике физического эксперимента. Описание методики можно найти в учебных пособиях по экспериментальной физике, например [8].

Для изготовления рядовых датчиков этот способ не подходит из-за очень малых скоростей нанесения покрытия и громоздкости технологических приемов.

Конденсирование в вакууме в чистом виде или в комбинации с гальванопластикой может найти применение при изготовлении полупроводниковых датчиков, толщина которых может измеряться микронами.

Способы получения конденсированных сплавов были разработаны академиком С. А. Векшинским и изложены им в монографии [17].

Электронское покрытие для изготовления трех слоев датчика принципиально неприменимо. Связано это с тем, что при нанесении последующего слоя искра выжигает примерно такое же количество вещества предыдущего слоя. Этот метод можно применять лишь при нанесении крайних слоев.

Металлизация распылением (шоопирование) представляет собой весьма эффективный способ изготовления датчиков. Этим способом может быть нанесено покрытие любым встречающимся в виде проволоки материалом. Принципиально метод покрытия состоит в том, что между двумя сходящимися проволоками, благодаря подаваемому напряжению, зажигается дуга, расплавляющая материал проволоки. Проволоки сходятся в устье сопла, через которое с большой скоростью протекает воздух или инертный газ. Струя газа срывает частички расплавленного металла и с такой же скоростью еще в размягнутом состоянии наносит их на покрываемую поверхность. Для создания четко очерченных границ датчика поверхность покрывается жестяным экраном с отверстием, по форме и размерам соответствующим датчику. При изготовлении датчиков способом металлизации мы воспользовались стандартным пистолетом для металлизации типа ЛК-33.

Более подробные сведения о технике металлизации распылением можно найти в работе [44].

На основании накопленного опыта по изготовлению датчиков металлизацией можно рекомендовать следующую технологию изготовления. В связи с дорогостоящей платиной и плохой склонностью серебра и меди к распылению металлизацию приходится применять только при нанесении среднего (основного) слоя датчика.

Крайние слои наносятся гальваническим способом. После нанесения первого слоя поверхность высушивается, аккуратно закрывается защитным экраном и равномерно покрывается промежуточным слоем при помощи металлизационного пистолета. Последующее гальваническое покрытие третьим слоем не представляет трудностей и производится в обычно принятом порядке. При нанесении третьего слоя необходимо устранить возможность закорачивания крайних слоев между собой. Для этого экранирующая обложка при гальванизации должна покрывать края среднего слоя, нанесенного путем металлизации.

Пайка — наиболее доступный способ изготовления датчиков с рабочей температурой до 500°C. В связи с низким температурным уровнем крайние слои изготавливаются медными или серебряными. В качестве материала для среднего слоя наиболее подходят константан и копель. Копель обладает несколько более высокой термо-э. д. с., но промышленностью изготавливается только в виде проволоки. Поэтому для изготовления копелевых датчиков мы применяли зуботехнические вальцы, позволяющие раскатывать проволоку в ленту. Константан же изготавливается промышленностью в виде лент толщиной от 0,1 мм и более чем достаточной ширины.

Выбор припоев проводится в зависимости от рабочих температур по ГОСТ 1499—54, 1534—42 и 8190—56.

В том случае, когда крепление датчика на рабочем месте предусматривается также при помощи припоя, температуру плавления последнего следует выбирать на 60—80°C ниже максимальной рабочей температуры. Температуру плавления припоя для слоя пластины датчика следует выбирать на 30—70°C выше температуры плавления припоя для крепления датчика на месте.

Применение наиболее легкоплавких, но еще допустимых для работы припоев позволяет при прочих равных условиях получить высококачественный датчик с отслаиванием между слоями датчика минимального количества припоя.

При выборе припоя необходимо обращать внимание на то, чтобы он не имел обратной, по сравнению с промежуточным слоем датчика, термоэлектрической полярности, так как это поведет к снижению эффективности датчика. По этому для константановых и копелевых датчиков нежелательны сурьмянистые припоя. Все оловянно-свинцовые, медно-цинковые и серебряные припоя термоэлектрически почти нейтральны относительно меди и серебра, и ими можно пользоваться, не опасаясь ухудшения свойств датчиков.

Технология крайне проста: заготовленные пластины по подлежащим сплавляемым поверхностям лудятся, затем нагреваются до температуры плавления припоя и сжимаются в нагретом состоянии с последующим охлаждением.

Сваркой изготовляются высокотемпературные датчики. Предлагаемая ниже технология высокочастотной сварки была разработана применительно к изготовлению съемных высокотемпературных датчиков. В принципе технология представляет собой организацию кузнечной сварки трех лепестков, образующих датчик.

Для предохранения довольно тонких деталей датчика от окисления вся оснастка вместе с заготовками деталей датчика помещается в герметичный сосуд, заполняемый неагрессивным газом. Детали датчика нагреваются при помощи высокочастотного индуктора, внутри которого помещается сосуд со сжимающими кулачками и заготовками датчика. Оснастка для сварки датчиков изображена на рис 40.

Устройство для сварки состоит из сжимающих колодок 4 и 10, и изготовленных из асбестоцементной массы, на которых крепят-

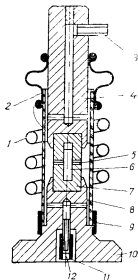


Рис. 40 Оснастка для сварки датчика токами высокой частоты

ся шамотные, dinasовые или кварцевые цилиндрические кулачки 7. Для взаимной центровки в кулачках 7 имеются центральные отверстия, в которые входит направляющая фарфоровая трубка 6. Перечисленные выше детали собираются внутри ступенчатого цилиндра 8, позволяющего визуально контролировать процесс. Внутренняя полость цилиндра 8 уплотняется резиновыми манжетами 2 и 9. Неагрессивный газ подается через шпатель 3 и сверления в колодке 4. Продувка происходит через сверления в колодке 10 и шпатель 11 с невозвратным резиновым клапаном 12. На рисунке также показаны заготовки датчика 5 и высокочастотный индуктор 1. При частоте питания индуктора 170—250 кГц оптимальное число витков индуктора равно 3—4. Индуктор навивается из медной трубки, внутри которой для охлаждения циркулирует вода.

Заготовки датчика при высокочастотной кузнечной сварке представляют собой плоские кольца, которые после сварки, в зависимости от местных условий работы датчиков, могут разрезаться на сегменты требуемых размеров.

После сборки оснастки вместе с датчиком производится продувка внутренних полостей неагрессивным газом. Объем внутренних полостей составляет несколько кубических сантиметров, поэтому можно применять даже сравнительно дорогостоящие благородные газы, например аргон или гелий. Пропуск 20—30 см³ газа обеспечивает практически полное вытеснение воздуха.

После продувки оснастка вставляется в индуктор и устанавливается на подставке. Режимы работы индуктора подбираются в зависимости от местных условий. При этом желательно, чтобы время накала не превышало 30 сек. При достижении накала датчика нажимом через колодку 4 обеспечивается плотность взаимного прилегания деталей датчика. После приложения сжимающего усилия следует примерно десятисекундная выдержка с последующим выключением индуктора. Прижимающее усилие сохраняется до остывания датчика.

На этом процесс сварки заканчивается и заготовка датчика извлекается из оснастки.

При отработанной технологии прочность сварки получается настолько высокой, что большинство испытанных на разрыв датчиков рвалось частично на плоскости сварки с дальнейшим переходом разрыва на целый металл.

Точечная сварка на конденсаторной машине применяется главным образом при изготовлении платиновых датчиков. Естественно, что использование платины экономно, минимальных отходов и потерь. Платиновая пластина раскатывается на вальцах до требуемой толщины крайнего слоя в 0,1—0,15 мм с многоразовым количеством протяжек и промежуточными отжигами

При этом надо добиваться, чтобы поверхность пластинки получалась ровной и гладкой и не требовала дополнительной механической обработки, связанной с отходами в виде стружки или пыли. Пластинки раскраиваются и поступают на штамповку. Было испробовано несколько конструкций штампов, чтобы по лучающиеся лепестки не имели заусенцев и могли без обработки идти на сварку (отработка штампования и режима сварки производилась на железных пластинках, как наиболее подходящих по механическим и теплофизическим свойствам для моделирования пластины). Наилучшим в наших условиях оказался прессовый штамп с ручным приводом и индивидуальной подгонкой и закалкой пуансонов и матриц.

Подготовленные лепестки свариваются на конденсаторной сварочной машине типа ТКМ-4 по следующей технологии. Для сварки выточены специальные медные электроды с диаметром цилиндрической части 1,5 мм и плоским срезом. Нижний электрод имеет диаметр 4 мм. Сначала в центрирующем приспособлении свариваются средние и один из крайних лепестков. Сварка производится по центру, затем концентрическим кругом с касанием отдельных «точек» сварки и, наконец, таким же кругом по краю датчика. Иной порядок сварки приводит к образованию между пластинками нежелательных прослоек воздуха. Таким же образом приваривается второй крайний лепесток.

Простота этого способа изготовления датчиков и достаточная прочность изделия побудила нас исследовать возможность приварки пластины из такого высокотеплопроводного материала, как медь. Были испробованы различные материалы электродов. В настоящее время можно с уверенностью сказать, что применение вольфрама или молибдена для верхнего электрода и серебра для нижнего позволяет решить задачу сварки меди с константаном или копелем и даже меди с медью.

31. КОНСТРУКТИВНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ОДИНОЧНЫХ ДАТЧИКОВ

Чувствительные элементы термомеров, основанных на принципе дополнительной стенки, выполняются обычно с отношением толщины δ к диаметру D , равным 1 : 10—1 : 100 для уменьшения оттока тепла через боковую поверхность стенки. При меньших δ / D , ввиду большого теплового сопротивления стенки, существенная доля тепла, вошедшего в «горячую» грань стенки («холодно») грани не достигнет, что внесет погрешность в измерение теплового потока по разности температур на гранях стенки. Подобное явление наблюдается и в приборах для определения теплопроводности материалов по методу пластины ГОСТ 7076—54 ограничивает отношение δ / D испытуемой пластины

№ датчика	Вид	Способ изготовления срезаемого слоя	Способ нанесения крайних слоев	Способ крепления съемных проводников	Область применения
1		Штамповка	Гальванипокрытие, пайка	Точечная сварка, пайка	Низкие температуры
2		Фрезеровка, слесарная обработка	То же	То же	То же
3		Шоопирование, гальванипокрытие	Шоопирование, гальванипокрытие	То же	Несъемные датчики
4		Штамповка, опилка	Кузнечная сварка	Пайка, точечная сварка	Высокие температуры
5		То же	То же	Точечная сварка	То же

Продолжение табл. 1

№ датчика	Эскиз	Способ изготовления донной среднего слоя	Способ нанесения или крайних слоев	Способ крепления съемных проводников	Область применения
6		Штамповка	Точечная сварка, пайка на серебро	Точечная сварка	Платиновые датчики
7		То же	Гальванопокрытие	Точечная сварка со средним слоем	Медные датчики
8		То же	То же	То же	То же
9		Штамповка, слесарная обработка	Точечная сварка	Точечная сварка с крайним слоем	Различные случаи теплообмена
10		То же	Пайка	Точечная сварка, пайка	Изделия с большой кривизной поверхности

Продолжение табл. 1

№ датчика	Эскиз	Способ изготовления среднего слоя	Способ нанесения или крайних слоев	Способ крепления съемных проводников	Область применения
11		Штамповка	Точечная сварка, пайка	То же, гретый провод из материала среднего слоя	Измерение теплового потока и температуры в одном месте

строительного материала величинами $1:10$ и $1:50$. Однако для некоторых материалов нельзя произвольно задавать это отношение (оптические кристаллы и др.), поэтому их теплопроводность определяют для образцов с $d/D < 1$, изолируя боковую поверхность и учитывая теплопотери через нее, или пренебрегая ими.

При создании металлических датчиков теплового потока среднего слоя было принято $d/D = 1:10$. Тонкого слоя изоляции боковой поверхности датчика при этом достаточно, чтобы теплопотери через нее были пренебрежимо малы даже при одинаковых граничных условиях на «холодной» и боковой поверхности датчика. Аналогично малым получается приток тепла через боковую поверхность при одинаковых граничных условиях с «горячей» поверхностью.

Конструктивное оформление одиночных датчиков теплового потока диктуется технологией их изготовления, а также условиями их предполагаемого применения.

В табл. 1 приведены эскизы датчиков различной конфигурации, испытанных нами в различные время, и указаны способы изготовления датчиков, крепления токопроводящих проводников, а также область применения того или другого датчика. Наибольшее распространение получили датчики 6, 7 и 9 изготавливавшиеся малыми сериями.

Толщина крайних пластин и съемных проводников берется минимальной из условий технологии крепления, прочности готового датчика, а также малых искажений тепловых явлений из-за теплопроводности вдоль проводников и усиков. В различных случаях мы применяли для съемных проводников проволоку толщиной $0,08-0,3$ мм. При толщине ее в $0,2-0,3$ мм кончик проволоки раскачивается до половины толщины на месте крепления с датчиком. Для электроизоляции проводни-

Продолжение табл. 1

№ образца	Эскиз	Способ изготовления среднего слоя	Способ нанесения крайних слоев	Способ крепления съемных проводников	Область применения
6		Штамповка	Точечная сварка, пайка на серебро	Точечная сварка	Платиновые датчики
7		То же	Гальванопокрытие	Точечная сварка со средним слоем	Медные датчики
8		То же	То же	То же	То же
9		Штамповка, лазерная обработка	Точечная сварка	Точечная сварка с крайним слоем	Различные случаи теплообмена
10		То же	Пайка	Точечная сварка, пайка	Изделия с большой кривизной поверхности

Продолжение табл. 1

№ образца	Эскиз	Способ изготовления среднего слоя	Способ нанесения крайних слоев	Способ крепления съемных проводников	Область применения
11		Штамповка	Точечная сварка, пайка	То же, гретый провод из материала среднего слоя	Измерение теплового потока и температуры в одном месте

строительного материала величинами $1/10$ и $1/50$. Однако для некоторых материалов нельзя произвольно задавать это отношение (оптические кристаллы и др.), поэтому их теплопроводность определяют для образцов с $\delta/D < 1$, изолируя боковую поверхность и учитывая теплопотери через нее или пренебрегая ими.

При создании металлических датчиков теплового потока для среднего слоя было принято $\delta/D = 1/10$. Тонкого слоя изоляции боковой поверхности датчика при этом достаточно, чтобы теплопотери через нее были пренебрежимо малы даже при одинаковых граничных условиях на «холодной» и боковой поверхности датчика. Аналогично малым получается приток тепла через боковую поверхность при одинаковых граничных условиях с «горячей» поверхностью.

Конструктивное оформление одиночных датчиков теплового потока диктуется технологией их изготовления, а также условиями их предполагаемого применения.

В табл. 1 приведены эскизы датчиков различной конфигурации, испытанных нами в различное время, и указаны способы изготовления датчиков, крепления токопроводящих проводников, а также область применения того или другого датчика. Наибольшее распространение получили датчики 6, 7 и 9 изготовлявшиеся малыми сериями.

Толщина крайних пластин и съемных проводников берется минимальной из условий технологии крепления, прочности готового датчика, а также малых искажений тепловых явлений за счет теплопроводности вдоль проводников и усиков. В различных случаях мы применяли для съемных проводников проволоку толщиной $0,08-0,3$ мм. При толщине ее в $0,2-0,3$ мм кончик проволоки раскатывается до половинной толщины на участке крепления с датчиком. Для электронизации проводни-

Продолжение табл. 1

№ датчика	Эскиз	Способ изготовления среднего слоя	Способ нанесения крайних слоев	Способ крепления съемных проводников	Область применения
6		Штамповка	Точечная сварка, пайка на серебро	Точечная сварка	Платиновые датчики
7		То же	Гальванопокрытые	Точечная сварка со средним слоем	Медные датчики
8		То же	То же	То же	То же
9		Штамповка, слесарная обработка	Точечная сварка	Точечная сварка с крайним слоем	Различные случаи теплообмена
10		То же	Пайка	Точечная сварка, пайка	Изделия с большой кривизной поверхности

Продолжение табл. 1

№ датчика	Эскиз	Способ изготовления среднего слоя	Способ нанесения крайних слоев	Способ крепления съемных проводников	Область применения
11		Штамповка	Точечная сварка, пайка	То же, третий провод из материала среднего слоя	Измерение теплового потока и температуры в одном месте

строительного материала величинами $1/10 - 1/50$. Однако для некоторых материалов нельзя произвольно задавать это отношение (оптические кристаллы и др.), поэтому их теплопроводность определяют для образцов с $d/D < 1$, изолируя боковую поверхность и учитывая теплопотери через нее или пренебрегая ими.

При создании металлических датчиков теплового потока для среднего слоя было принято $d/D = 1/10$. Тонкого слоя изоляции боковой поверхности датчика при этом достаточно, чтобы теплопотери через нее были пренебрежимо малы даже при одинаковых граничных условиях на «холодной» и боковой поверхности датчика. Аналогично малым получается приток тепла через боковую поверхность при одинаковых граничных условиях с «горячей» поверхностью.

Конструктивное оформление одиночных датчиков теплового потока диктуется технологией их изготовления, а также условиями их предполагаемого применения.

В табл. 1 приведены эскизы датчиков различной конфигурации, испытанных нами в различное время, и указаны способы изготовления датчиков, крепления токосъемных проводников, а также область применения того или другого датчика. Наибольшее распространение получили датчики 6, 7 и 9 изготавливавшиеся малыми сериями.

Толщина крайних пластин и съемных проводников берется минимальной из условий технологии крепления, прочности готового датчика, а также малых искажений тепловых явлений за счет теплопроводности вдоль проводников и усиков. В различных случаях мы применяли для съемных проводников проволоку толщиной $0,08 - 0,3$ мм. При толщине ее в $0,2 - 0,3$ мм кончик проволоки раскатывается до половины толщины на участке крепления с датчиком. Для электроизоляции проводни-

Продолжение табл. 1

№ изделия	Эскиз	Способ изготовления для среднего слоя	Способ нанесения на крайних слоев	Способ крепления съемных проводников	Область применения
6		Штамповка	Точечная сварка, пайка на серебро	Точечная сварка	Платиновые датчики
7		То же	Гальванопокрытие	Точечная сварка со средним слоем	Медные датчики
8		То же	То же	То же	То же
9		Штамповка, слесарная обработка	Точечная сварка	Точечная сварка с крайним слоем	Различные случаи теплообмена
10		То же	Пайка	Точечная сварка, пайка	Изделия с большой кривизной поверхности

Продолжение табл. 1

№ изделия	Эскиз	Способ изготовления для среднего слоя	Способ нанесения на крайних слоев	Способ крепления съемных проводников	Область применения
11		Штамповка	Точечная сварка, пайка	То же, третий провод из материала среднего слоя	Измерение теплового потока и температуры в одном месте

строительного материала величинами $1 \cdot 10^{-1} \cdot 50$. Однако для некоторых материалов нельзя произвольно задавать это отношение (оптические кристаллы и др.), поэтому их теплопроводность определяют для образцов с $\delta/D < 1$, изолируя боковую поверхность и учитывая теплопотери через нее или пренебрегая ими.

При создании металлических датчиков теплового потока для среднего слоя было принято $\delta/D = 1:10$. Тонкого слоя изоляции боковой поверхности датчика при этом достаточно, чтобы теплопотери через нее были пренебрежимо малы даже при одинаковых граничных условиях на «холодном» и боковой поверхностях датчика. Аналогично малым получается приток тепла через боковую поверхность при одинаковых граничных условиях с «горячей» поверхностью.

Конструктивное оформление одиночных датчиков теплового потока диктуется технологией их изготовления, а также условиями их предполагаемого применения.

В табл. 1 приведены эскизы датчиков различной конфигурации, испытанных нами в различные время, и указаны способы изготовления датчиков, крепления токосъемных проводников, а также область применения того или другого датчика. Наибольшее распространение получили датчики 6, 7 и 9 изготовлявшиеся малыми сериями.

Толщина крайних пластин и съемных проводников берется минимальной и. условий технологии крепления, прочности готового датчика, а также малых искажений тепловых явлений за счет теплопроводности вдоль проводников и усиков. В различных случаях мы применяли для съемных проводников проволоку толщиной 0,08—0,3 мм. При толщине ее в 0,2—0,3 мм кончик проволоки раскачивается до половины толщины на участке крепления с датчиком. Для электронизации проводни-

ков применяется распушенное асбестовое волокно, кремниевая органическая нить, стеклочудло с пропиткой лаком ФЭБС-Л-302 а для температур до 250—300°C — термостойкий поливиниловый лак

В случае необходимости измерения одновременно с тепловым потоком и температуры в датчик вваривается третий токо-съемный провод, одинаковый по материалу со средним слоем датчика

32. ТЕРМОСТАТИРОВАНИЕ СОЕДИНЕНИЯ ВО ВНЕШНЕЙ ЦЕПИ ДАТЧИКА

Применение в датчиках драгоценных металлов (платина, серебро) затрудняет передачу рабочего сигнала на нужные расстояния. При температурных измерениях, чтобы облегчить передачу сигнала, применяют компенсационные провода.

Формально датчик представляет собой дифференциальную термопару, поэтому функции компенсационных проводов может выполнять любая пара одинаковых и достаточно однородных проводов, например медных. Фактически же дело осложняется тем, что сигнал датчика существенно мал по сравнению с сигналом термопары, работающей при сходных температурах, и поэтому приходится быть особенно внимательным к возможным источникам помех, например, при переходе от платины к меди к неравенству температур спаев пары проводов, относящихся к одному датчику. В практике измерении может быть много причин, обуславливающих такое неравенство температур спаев. Для устранения неравенства температур спаев применяются термостаты, заключающие в себе места спаев с компенсационными проводами

При расчетах и конструировании термостатов было принято допустимым отличие в температурах спаев отдельного датчика в 10^{-4} град при внешнем возмущении, выражающемся в разнице температур подходящих проводов в 10 град, что в реальных условиях вполне возможно.

Термостат представляет собой массивный медный цилиндр на внешней поверхности которого нарезаны винтовые канавки для проводов в изоляции. Места спаев располагаются так, что расстояния их от выхода проводов из термостата прямо пропорциональны теплопроводностям материалов проводников. Цилиндр с нарезкой и намотанными проводами вставляется в полый медный цилиндр, плотно прилегающий к выступам нарезки

Блок из медных цилиндров окружается со всех сторон высокоэффективной теплоизоляцией и заключается в стальной цилиндр с плотной крышкой. Последний, выполняя функции тепловой защиты, экранирует также внутренни блок от электромаг-

нитивных возмущений, источником которых может быть объект измерений.

Для обычной тонкой лаковой электроизоляции суммарная длина одного проводника, заключенная в лабиринте термостата до и после спаев, должна составлять 3000 калибров провода. При этом коэффициент теплового демпфирования равен примерно 10^5 , т. е. при внешней разности температур проводов в 10 град разность температур спаев не превысит 10^{-4} град

Специальные экспериментальные исследования подтвердили ожидаемую эффективность термостатирования

33 УСИЛЕНИЕ И РЕГИСТРАЦИЯ СИГНАЛА ДАТЧИКА

Величина минимального значения выходной мощности одного датчика может быть сравнительно просто подсчитана

Oриентировочно примем следующие средние значения рабочих параметров датчика теплопроводность среднего слоя $\lambda = 20$ вт/м·град, удельная термо-э д с. $u = 40 \cdot 10^{-6}$ в/град, толщина датчика $\delta = 1$ мм = 0,001 м, минимальная чувствительность по тепловому потоку $q_{\text{min}} = 300$ вт/м²; сопротивление цепи $R = 100$ ом

Полную э д с датчика, силу тока в цепи и мощность отключения обозначим соответственно через E , I и P . Дальнейшие выкладки объяснений не требуют

$$\Delta t = \frac{q\delta}{\lambda};$$

$$E = n\Delta t i = u \frac{q\delta}{\lambda} = 0,6 \cdot 10^{-4} \text{ в};$$

$$P = \frac{E^2}{R} = 3,6 \cdot 10^{-11} \text{ вт};$$

$$I = \frac{E}{R} = 6 \cdot 10^{-7} \text{ а}$$

В начальный период работы с первыми датчиками (1955—1956 гг.) промышленность не выпускала серийно приборы, чувствительность и внутреннее сопротивление которых удовлетворяли бы поставленным требованиям. Поэтому мы столкнулись с необходимостью усиления сигнала датчика. В настоящее время для измерения таких малых мощностей используются серийные гальванометры типа М-195. Опыт работы с усилителями показал, что таким образом может быть существенно расширен диапазон работы одиночных датчиков при очень малых потоках. Для таких датчиков принятая выше мера чувствительности 300 вт/м² может оказаться на несколько порядков больше верхнего предела их измерения

Рассмотрев различные усилители постоянного тока, мы остановились на магнитном усилителе. Магнитный усилитель успешно позволяет измерять мощности постоянного тока в 10^{-19} ст при высокой стабильности нуля и коэффициента усиления [73]. Изготовленный усилитель имеет два каскада усиления собран по дифференциальной схеме (рис. 4).

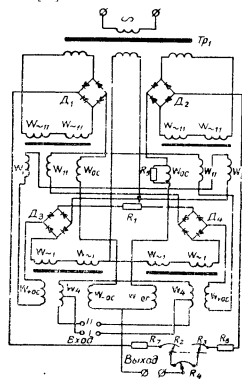


Рис. 4. Электрическая схема магнитного усилителя.

Недостаток данного усилителя заключается в непрерывном монотонном дрейфе нуля, что вызывало необходимость в подрегулировке баланса переменными сопротивлениями R_2 — R_3 и R_4 , а иногда и R_1 . Это не могло не вызывать некоторого изменения коэффициента усиления. Последнему способствовала также недостаточная стабильность примененных при изготовлении прибора полупроводниковых диодов.

В дальнейшем были опробованы некоторые другие схемы усиления, в частности комбинированные. Наилучшим вариантом усилителя в наших условиях явилось сочетание магнитного модулятора и усилителя низкой частоты на электронных лампах. Магнитный модулятор работает как усилитель напряжения с

большим переменным насыщением. Электронная часть усилителя выполнена по двухтактной схеме с глубокой отрицательной связью. В этом усилителе удалось добиться высокого стабильного коэффициента усиления и весьма малого дрейфа нуля. Однако полностью избавиться от некоторых случайных помех, проявляемых в спорадических колебаниях индикатора прибора, не удалось.

В настоящее время проводятся работы по усилению сигнала одиночного датчика с помощью серийно выпускаемого фотокомпенсационного усилителя типа Ф-115.

Естественно, что мы стремились обойтись без усилителя и приобрести стандартные электротехнические приборы, чувствительность которых оказалась бы достаточной для работы в паре с одиночным датчиком теплового потока. Вполне приемлемыми оказались переносные теневые гальванометры типа М-195/1 и М-195/2 и миллиамперметр типа М-95. При тарировке платино-константановых датчиков максимального теплового потока в $1,3 \cdot 10^5$ вт/м² соответствовало отклонение светового указателя чувствительного элемента гальванометра М-195/2 на 350—400 мм, что дает возможность производить измерения в трех диапазонах ($\times 1$; $\times 2$; $\times 5$). Сопротивление датчика значительно меньше критического для М-195/2, поэтому при измерениях теплового потока чувствительный элемент находится в переусвоенном режиме и регистрация сигнала происходит за время порядка 30 сек. С этой точки зрения лучше использовать модифицированный гальванометр М-195/1 с малым внутренним сопротивлением.

Большые перспективы открывает использование в паре с одиночными датчиками приборов типа Ф-16 и Ф-118, использующих фотокомпенсационное усиление сигнала.

Большим перспективой открывает использование в паре с одиночными датчиками приборов типа Ф-16 и Ф-118, использующих фотокомпенсационное усиление сигнала.

Большые перспективы открывает использование в паре с одиночными датчиками приборов типа Ф-16 и Ф-118, использующих фотокомпенсационное усиление сигнала.

Большые перспективы открывает использование в паре с одиночными датчиками приборов типа Ф-16 и Ф-118, использующих фотокомпенсационное усиление сигнала.

34. БАТАРЕЙНЫЕ ДАТЧИКИ ТЕПЛОГО ПОТОКА

Единственный, однако весьма существенный недостаток одиночного датчика теплового потока заключается в том, что электрический сигнал мал. Поэтому наиболее широкое применение он, по-видимому, найдет в технике измерения локальных тепловых потоков, исчисляемых миллионными ватт на кв. метр где его можно применять в паре с достаточно грубым милливольтметром или стандартным самописцем.

Далее, для интервала тепловых потоков 10^4 — 10^5 вт/м² одиночные датчики вполне успешно применяются в паре с чувствительными гальванометрами. Такое сочетание позволяет с высокой точностью регистрировать визуально значения измеряемых величин, но для автоматической записи сигнала пригодны лишь чувствительные осциллографы. Поэтому необходимо было изыскивать пути к увеличению выходного сигнала

датчика. Существенного увеличения удельной термо-э. д. с. ожидать неуктуда. Можно применить в качестве среднего слоя некоторые из металлокерамических материалов, в частности карбид кремния, термо-э. д. с. которого, по данным Ленинградского института полупроводников, составляет $200 \cdot 10^{-6}$ в/град, т. е. в пять раз больше, чем у металлов, в широком диапазоне температур. Так как карбид кремния имеет сравнительно малую теплопроводность, его применение может на один порядок увеличить чувствительность датчика, однако не делает датчик универсальным.

Для увеличения сигнала датчика можно соединить последовательно друг с другом. Такой способ рекомендуется для определения средних на большой поверхности тепловых потоков, однако если исследуемое изделие токопроводящее, то необходимо заботиться об электроизоляции от него отдельных датчиков.

Батарейный датчик состоит из большого количества датчиков теплового потока, соединенных последовательно в одном агрегате. Для элементарных датчиков в нем уже не нужно выдерживать отношения $\delta : D < 1$, так как при плотном их расположении утечка из одного элементарного датчика неизбежно связана с соответствующим притоком в соседних. Все, что говорится о величине $\delta : D$, применимо к агрегату в целом.

В настоящее время удается изготавливать батарейные датчики с количеством элементарных датчиков до 2000 шт. на 1 см^2 . Это позволяет использовать в качестве регистрирующих приборов самописцы типа ЭПП-09, милливольтметры и потенциометры. При использовании же чувствительных гальванометров можно измерять тепловые потоки порядка 10^{-2} вт/м².

Требования к гомогенности для съемных проводников батарейного датчика резко снижаются.

Наконец, создание батарейных датчиков позволяет решить очень важную задачу исследования локального теплообмена во вращающихся деталях.

Первый батарейный датчик имел прямоугольную форму (рис. 42) и был изготовлен следующим образом. Для среднего слоя было приготовлено 100 параллелепипедов из константана размером $1 \times 2 \times 2 \text{ мм}$, т. е. с $\delta : D = 1 : 2$. Полоска из красной меди толщиной 0,1 и шириной 2 мм приваривалась к верхней грани датчика, подгибалась и прикреплялась к нижней грани следующего датчика. Свободные грани в этой цепочке имели датчики, расположенные рядом. К ним прикреплялись медные гибкие проводники (монтажный провод). Готовая цепочка датчиков укладывалась в металлический кожух — обечайку с наваренным тонким доньшком. Вся внутренняя поверхность кожуха выкладывалась слоем слюды толщиной около 0,03 мм. Полоски слюды прокладывались также между рядами датчи-

ков. Свободные полости заполнялись массой, замешанной из кварцевой пудры на одном из термостойких клеев. После технологически необходимой сушки и полимеризации обечайка закрывалась крышкой, привариваемой к ней.

Поскольку эквивалентная теплопроводность батарейного датчика получилась равной примерно 10 вт/м^2 , в качестве материала для кожуха была выбрана сталь. Общие размеры дат-

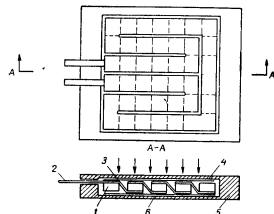


Рис. 42 Батарейный датчик прямоугольной формы

1 — промежуточный электрод, 2 — выводы, 3 — заполнитель, 4 — изоляция, 5 — корпус, 6 — перемычный электрод

чка $28 \times 30 \times 1,6 \text{ мм}$. Так как первый же датчик показал отличные качества — высокий стабильный сигнал и малую инерционность, то было изготовлено еще несколько таких датчиков. Для изготовления датчиков одинакового размера, изгиба и обрезки медной фольги, центровки деталей при контактной сварке или пайке, были сделаны приспособления «малой механизации». Кожухи стали делать цилиндрическими (рис. 43). Для более плотной «укладки» исходные датчики могут изготавливаться не квадратными, а треугольными с равными сторонами. Диаметр стократного батарейного датчика по этой технологии доведен до 25 мм.

Один из таких датчиков демонстрировался нами на II Всесоюзном совещании по экспериментальной технике и методам высокотемпературных измерений в мае 1962 г. и вызвал оживленный интерес.

Дальнейшее снижение габаритов датчика, выполненного по описанной схеме, является затруднительным. Кроме того, полу-

чив два порядка увеличения сигнала, а вместе с ними и возможность решать новые задачи локального теплообмена, мы решили продолжить поиск средств дальнейшего увеличения сигнала.

Было решено увеличить $\delta \cdot D$ элементарного датчика до 5—10. По описанной выше технологии сделать такой датчик при общей толщине 1—1,5 мм невозможно. Поэтому была испробована новая схема батарейного датчика, предложенная О. А. Ге-

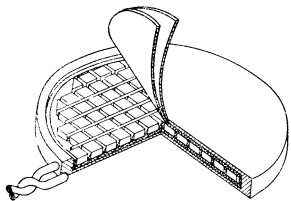


Рис. 43 Батарейный датчик цилиндрической формы

ращенко. Отличие этого датчика состоит в том, что для передачи тепла от одной грани батарейного датчика к другой используется материал в равной мере (вернее, в мере, пропорциональной теплопроводности) всех слоев датчика — крайних и среднего (рис. 44). Такая батарея по виду сходна с батареей термостолбиков, но отличается от нее тем, что в новом датчике по-прежнему регистрируется тепловой поток, прошедший через датчик. Показания его, в отличие от батареей термостолбиков, не зависят (в известных пределах, конечно) от условий охлаждения холодных спаев. От малых тепломеров Шмидта датчик по-прежнему отличается использованием в качестве дополнительной стенки материала термоэлектродов.

Теоретически на каждый квадратный сантиметр батарейного датчика при толщине проводников элементарных датчиков 0,1 мм и изоляции на них 0,01 мм можно уложить до 10 000 элементарных датчиков. Практическая разработка этой схемы ведется в двух направлениях.

1. Изготавливается сетка из двух термоэлектродных материалов (один из них является основой, другой — утком.

рис. 45, а). Места контакта проводников свариваются. Затем из сетки вырезаются полосы таким образом, что они состоят из чередующихся отрезков обоих электродов. Ленточка-лесенка изолируется и сжимается так, как указано на рис. 45, б и в. Сжатая ленточка укладывается в плотный пакет ряд к ряду (рис. 45, г). Для плетения сетки в лаборатории изготовлен ткацкий станок на ширину ленты до 70 мм и шаг сетки 0,5—1,5 мм. Механизация резки полосы и подгибания проводников — дело будущего. Опытные укладки проводились вручную и показали достаточно большой коэффициент заполнения сечения металла.

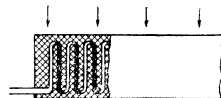


Рис. 44 Схема батарейного датчика с большим $\delta \cdot D$

2. Изготавливается плоская спираль — ленточка из термоэлектродного материала (например константана). Одна из боковых поверхностей спирали электролитически покрывается медью (рис. 46). Ленточка покрывается лаком и сворачивается так, чтобы места перехода от меди к константану находились на гранях получающегося диска. Свойства таких гальванических термопар исследованы в работе [20]. Диск заливается эпоксидной смолой или высокотемпературным лаком (в этом

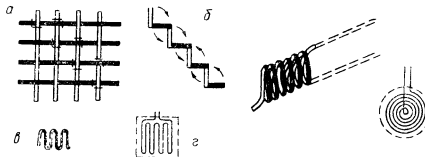







Рис. 45 Схема изготовления датчика из сетки

Рис. 46 Схема изготовления датчика из спирали

случае диск закладывается в металлический кожух). Так как отдельные операции (навивку ленточки, гальванизацию) удалось механизировать, на этом пути достигнуты большие успехи.

Изготовлено и испытано несколько спиральных датчиков с количеством элементарных датчиков до 2000 на 1 см², т. е. примерно с плотностью заполнения в пять раз меньше теоретической. Толщина такого батарейного датчика 1—1,5 мм.

Нет принципиальных препятствий для изготовления датчиков на высокие температуры [28]. В лаборатории проводятся

Способ изготовления датчиков	Материал	Размер (толщина) стандартных датчиков	Особенности
 1	Вальцовка, резка, сварка или пайка	1,5x2,7 100 шт	Потери тепла от сооружений и теплоизоляции, прибор для теплофизических констант
	То же	То же	Большие потоки на вращающихся деталях
 2	То же	То же	То же, высокие температуры
	Плетение сетки, резка, изоляция, укладка	1,5x15 3000 шт	Очень малые потоки
 3	То же	То же	То же, высокие температуры
	Навивка птоковой спирали, гальванирование, лакирование, свертывание в спираль	1,5x15 1200 шт	Калориметрическая термография
 4	То же	То же	Вращающиеся детали, малые потоки
	То же	То же	То же, высокие температуры
 5	То же	То же	То же, высокие температуры
	То же	То же	То же, высокие температуры

опыты по запеканию датчика в фарфоровую таблетку. Если медный константан заменить платинированным иридием, то при фарфоровом наполнении можно получить батарею, работоспособную при температурах свыше 1000°C.

В табл. 2 приведены конструкции батарейных датчиков и указаны области их применения.

Так же как и для одиночного датчика, измерение температуры достигается выводом третьего провода.

35. МЕТОДИКА ГРАДУИРОВКИ ДАТЧИКОВ

В принципе, если строго соблюдать толщину срезаемого слоя датчика, знать его теплопроводность и другие характеристики термоэлектродов, а также чувствительность регистрирующего прибора, можно было бы для каждого датчика получить градуировочные характеристики расчетным путем. Однако на этом пути ошибки подстерегают буквально на каждом шагу. Так, при изготовлении, например, парии одиночных датчиков в 30 шт из одних и тех же материалов, по одной технологии и т. д. максимальное расхождение между характеристиками отдельных датчиков достигает 25—40%, причем естественно, что каждая из них более или менее отличается от расчетной. Поэтому пока что каждый датчик проходит индивидуальную градуировку — через датчик пропускается стабильный контролируемый тепловой поток, измеренный абсолютным прибором, и измеряется э. д. с. датчика. Так как на показания датчика может в некоторой мере влиять его собственная температура, для каждой градуировочной кривой фиксируется интервал температур, при котором она получена.

Наиболее удобным для градуировки оказался рациональный метод подвода энергии к датчикам. Этот метод привлек наше внимание возможностью получения направленных контролируемых тепловых потоков и постоянства граничных условий.

Для получения стабильных потоков излучения и для их абсолютного измерения были разработаны приборы, описанные в гл. III и частично в гл. II настоящей работы. Длительное время градуировка датчиков производилась только с помощью компенсационного радиометра. Поэтому методически важно было максимально приблизить условия теплообмена датчика во время градуировки к условиям теплообмена для пластин радиометра. Для этого головка радиометра изготавливается полой, квадратного сечения, с возможностью выставить каждую грань на определенном расстоянии от источника излучения. На двух противоположных гранях головки укреплены пластины радиометра, на одной стороне съемная кассета с датчиком. Размер радиометрической пластины в направлении обтекания воздухом выбран тот же что и у датчика — 8 мм. Условия

обтекания также одинаковы. С лицевой стороны пластины и датчик покрыты чернью одинакового состава. Все это позволяет говорить о строгом соответствии условий подвода и отвода тепла для датчиков и пластин радиометра, а при высокой стабильности излучаемого потока — и о правомочности принятой методики градуировки датчиков по принципу измерение потока радиометром — запись показаний регистрирующего прибора датчика — измерение потока радиометром.

Регулировать температуру датчиков и пластин радиометра можно за счет изменения скорости охлаждающего воздуха. Для измерения температуры пластины от промежуточного термозлектрода дифференциальной термопары сделан отвод.

В дальнейшем после градуировки нескольких контрольных датчиков на блоке инерционного радиометра и проверочных испытаний радиометров обоих типов одиночные и батарейные датчики, предназначенные для работы при невысоких температурах, могли градуироваться также и с помощью воздухоохлаждаемой пластины. Для этого кронштейн-координатник был устроен таким образом, чтобы можно было попеременно фиксировать в одном и том же положении по отношению к источнику излучения приемные плоскости того или другого радиометра и градуируемых датчиков. Таким же образом могут градуироваться и несъемные датчики. Теплосток для них служит изделие, на котором они закреплены.

36. СТЕНД ДЛЯ ГРАДУИРОВКИ ДАТЧИКОВ

При проектировании градуировочного стенда мы стремились получить максимально точные результаты градуирования, удобства и простоту в обслуживании.

Каркас стенда сварен из уголков, обшит сверху текстолитом толщиной 14 мм, с боков — алюминиевым листом (рис. 47). На возвышающейся части стенда укреплены излучатель и кронштейн-координатник радиометров и датчиков. Снизу к излучателю подведена охлаждающая вода и шины питания нагревателя.

Координатник представляет собой толстостенную стальную трубу длиной около 1 м, которая может перемещаться вдоль оси и поворачиваться в двух клеммовых опорах, на одной из которых установлен фиксатор координатника. По длине трубы сделано два ряда лунок, в которые при фиксации положения попадает конец штока пружинного фиксатора. Один ряд лунок служит для фиксирования головки компенсационного радиометра напротив амбразуры излучателя. Второй, составляющий с первым угол в $\frac{2\pi}{3}$ рад — для фиксирования кронштейна инерционного радиометра или изделия с прикрепленными к нему

датчиками. Для удобства перемещения относительно фиксатора от лунки вдоль оси и в поперечном направлении профрезерованы неглубокие канавки. Таким образом, координатник позволяет быстро и точно фиксировать прибор на заданном расстоянии относительно источника лучистой энергии.

На одном конце координатника закреплен компенсационный радиометр. Из него в трубку выведены провода питания пластин радиометра, а также электроды дифференциальной термопары и медные проводники, служащие для съема падения напряжения на радиометрических пластинках. Все эти проводники выводятся из трубки через уплотнение в боковом штуцере.

Сечение трубы выбрано так, что остается достаточно места для прохождения без больших потерь охлаждающего воздуха, который входит с другого конца трубы и проходит внутрь корпуса радиометра для охлаждения пластин. На входе в координатник воздушная линия имеет задвижку, с помощью которой можно регулировать расход воздуха через головку радиометра сбросом в окружающую среду.

На панель стенда выведены органы управления, контроля и регулирования обогрета излучателя и пластин радиометров, тумблер нагнетателя воздуха, а также центральный переключатель. К его контактам подведены проводники съема падения напряжения на пластинках радиометра и на шунтах (для измерения силы тока), а также электроды балансной термопары, позволяющей измерять температуру пластин радиометра или контролировать ее равенство на обеих пластинках. Пара проводов от центрального переключателя выводится наружу и подается на высокоомный потенциометр Р-307, установленный на столе стенда. Здесь же располагаются нуль-гальванометр и нормальный элемент к потенциометру, а также амперметр, контролирующий силу тока в первичной цепи трансформатора питания нагревательного элемента излучателя.

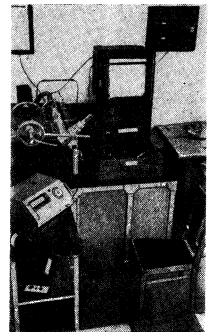


Рис 47. Стенд для градуировки датчиков

Внутри стелда на полках и панелях размещены питание радиометра в виде двух блоков для каждой пластины, нагреватель воздуха, контактный манометр и блокировка нагревательного элемента излучателя. Самопишущие потенциометры ЭПП-09 и КВТИ/ЕН расположены вблизи стелда на стенах помещения.

На отдельном столике располагается аппарататура датчиков термостат, коммутатор, регистрирующий прибор. При градуировке датчиков в кассетах они подключаются к коммутатору и развешиваются на специальных подвесках.

37. ГРАДУИРОВКА НА КОМПЕНСАЦИОННОМ РАДИОМЕТРЕ

Для получения одинаковых условий подвода и отвода тепла каждый датчик заформовывался в специальную кассету. Кассета должна удовлетворять двум требованиям: строго идентичная установка датчика относительно грани головки радиометра и минимальный радиальный отток тепла. Первоначально кассеты

делались металлическими с отверстием для датчика и канавкой для вывода его концов. Датчик устанавливался в кассете, зазор между ним и кассетой заливался жидким стеклом, которое при нагреве вспучивалось и создавало изоляцию от металла кассеты. Однако практически оказалось, что правильно устанавливать датчики при достаточно больших зазорах трудно. При малых же зазорах (0,1—0,5 мм) изолирующие свойства тонкого слоя вспученного стекла оказывались недостаточными, часть тепла, воспринятого датчиком, перетекала в холодную кассету и прибор давал заниженные

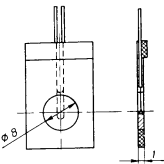


Рис 48 Фарфоровая кассета с датчиком

показания. Поэтому датчики стали заформовывать в фарфоровые кассеты. Датчик закладывается в гипсовую форму и заливается фарфоровой массой (шпикером) таким образом, что обе плоскости датчика оказываются заподлицо с гранями кассеты. После сушки и выемки из формы кассеты без обжига покрываются термостойким лаком, а сторона, обращенная при тарировке к излучателю, — дополнительно той же чернью, что и пластины радиометра. Кассеты оказались достаточно прочными, чтобы не крошиться при многократном вдвигании в пазы на головке радиометра. Датчик в кассете показан на рис 48. Теперь при облучении радиационной энергией датчик и кассета одинаково нагреваются и отводом тепла через кассету к холодной головке радиометра можно пренебречь.

Теплопроводность фарфоровой кассеты существенно меньше эффективной теплопроводности датчика. В связи с этим только задняя стенка датчика и кассеты будут расположены по изо термической поверхности. На передней же стенке температура частиц фарфора возле датчика будет выше температуры частиц собственно датчика. Благодаря этому тепло из кассеты потечет в датчик. Поскольку датчик и кассеты тонки, такое перетекание практически не оказывает влияния на тарировку.

В случае изготовления партии датчиков в 30—50 шт тарировка их состоит из нескольких этапов. На первом этапе несколько датчиков тарируются по очереди без коммутирующего устройства и термостата, с непосредственным креплением токоусъемных проводников к клеммам регистрирующего прибора, защищенных медной корочкой от внешних возмущений. При этом используются четыре-пять позиций координатника и два-три режима излучателя. Затем те же датчики собираются на панели коммутирующего устройства и градуировка повторяется для выявления влияния на показания прибора промежуточных контактов, удлинительных проводов и т. п. Наконец, вся партия датчиков комплектами по 10 шт проходит градуировку с полной схемой коммутации и термостатированием свободных концов.

На каждый датчик ведется протокол градуировки, в котором отмечается дата, время градуировки, позиция координатника и температура излучателя. В него заносятся данные измерений: начальный небаланс η на дифференциальном термометре компенсационного радиометра, ϵ и τ на термометры теневой пластины сила тока через нее, падение напряжения на ней. Затем фиксируется количество делений регистрирующего прибора и наконец, конечный небаланс нуля при повторном измерении потока радиометром (без изменения нагрева теневой пластины). Начальный небаланс допускается не более $\pm 0,001\%$ температуры пластины для данного измерения, конечный небаланс допускается вдвое большим. Небаланс регистрируется в протоколе градуировки в виде количества делений нуля гальванометра, на которое отклоняется его зайчик от нулевого положения в сторону превышения температуры теневой пластины над облучаемой (+ небаланс) или в противоположную сторону (— небаланс). Цена деления нуля гальванометра проверяется с помощью потенциометра Р 307. Если конечный небаланс существенно отличается от указанного величины 0,002% температуры пластины, то данный опыт повторяется (т. е. снова балансируется радиометр и т. д.).

В тот же протокол заносятся расчетные данные — мощность выделяемая на электрообогреваемой пластине радиометра Q по ней — тепловой поток, зафиксированный в данном опыте.

За время первых опытов по градуировке было накоплено достаточное количество данных по зависимости падения напряжения на пластине радиометра от силы тока, протекающего через нее, и были построены графики $\Delta u = f(I)$, $P = f(I)$ и $Q = f(I)$. На рис. 49 приведены эти графики для случая макси-

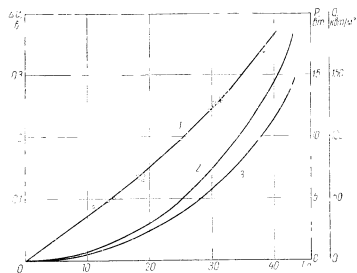


Рис. 49. Рабочие характеристики компенсационного радиометра
1 — $\Delta u = f(I)$ 2 — $P = f(I)$ 3 — $Q = f(I)$

мального обдува пластин. В дальнейшем замеры падения напряжения проводились лишь в контрольных опытах.

Данные протокола представляются в виде индивидуальной градуировочной кривой датчика с нанесением на нее всех тех же, соответствующих каждому опыту.

38. ГРАДУИРОВКА НА ВОДООХЛАЖДАЕМОЙ ПЛАСТИНЕ

При изготовлении датчиков на низкие рабочие температуры градуировку их удобно производить с отводом тепла к стенке охлаждаемой проточной воды. Такая возможность появилась после контрольных тарировок датчиков на блоке инерционного радиометра.

Градулируемые датчики припаиваются или приклеиваются к плоской стенке водоохлаждаемой коробки. Коробка укрепляется на координатнике при помощи штока и винтового универсального зажима, позволяющего выставлять плоскость коробки в нужное положение относительно излучателя.

Расход воды обеспечивает практическое постоянство температуры одиночных датчиков ввиду большого α_2 и малых $\frac{\delta}{\lambda}$.

Датчики градуируются обычно с помощью компенсационного радиометра, как более чувствительного и точного, а контролируют их также и с помощью инерционного прибора. Последовательность операции при градуировке сохраняется, только термостатический радиометр и пластина (поворотом трубки координатника) меняются местами перед излучателем. На пластине укрепляется до 10 одиночных датчиков одновременно.

Батарейные датчики, которые мы до сих пор изготавляли, предназначаются для работы при температуре до 100°C. Поэтому все они проходят градуировку на холодной пластине. Датчики с кратностью порядка 100 (галетные) градуируются в зависимости от интервала тепловых потоков с гальванометром милливольтметром или потенциометром Р-307. Датчики с кратностью до 2000 (спиральные) — с потенциометром Р-307 или ЭПП-09.

ГЛАВА 1

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ГРАДУИРОВКИ И ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ С ПОМОЩЬЮ ДАТЧИКОВ

39. ПОГРЕШНОСТИ ГРАДУИРОВКИ. ХАРАКТЕР ГРАДУИРОВОЧНОЙ КРИВОЙ

В гл. III установлено, что с помощью компенсационного радиометра падающий тепловой поток можно измерить с точностью до 3% измеряемой величины. Рассмотрим погрешности градуировки одиночного датчика, помещаемого в кассете в головку радиометра, и характер градуировочной кривой.

Будем различать погрешность как результат того или иного опытного отклонения от нормы, выражающихся в разбросе опытных точек, и изменение чувствительности датчика по сравнению с теоретической чувствительностью из-за несовершенства технологии изготовления.

Погрешности градуировки возникают по различным причинам. Падающий тепловой поток может несколько измениться за время измерения его радиометром и датчиком. Повторное измерение радиометром и достаточно жесткие требования к совпадению результатов обоих измерений позволяют оценить такое изменение теплового потока не более чем в 0,1%.

Одним из источников погрешностей измерения при градуировках является неточность в установке градулируемого датчика

на место радиометрической пластины, измерения которой мы принимаем за основу. На рис 50 приведены графики зависимости тепловых потоков в радиационной печи от расстояния до амбразуры. Кривые получены на различных режимах рабо-

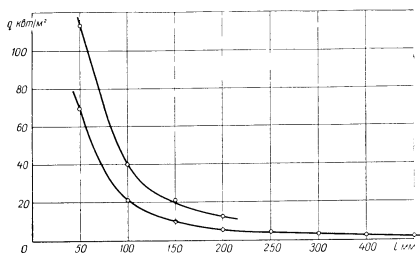


Рис 50 График зависимости тепловых потоков радиационной печи от расстояния до амбразуры

ты печи и отличаются друг от друга лишь масштабом по оси ординат

Пренебрегая малыми величинами высшего порядка, можно записать

$$\frac{\Delta E}{\Delta x} = \frac{dE}{dx}, \quad (5.1)$$

откуда относительная погрешность в измерении потока энергии

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{dE}{dx} \cdot \frac{\Delta x}{E}. \quad (5.2)$$

Здесь значение $\frac{dE}{dx}$ может быть легко получено графическим дифференцированием графиков рис 50

Значение величин $\frac{dE}{dx} : E$ по рис 50 в широком диапазоне расстояний от амбразуры составляет $(1,5-2) \cdot 10^{-2}$, т. е. 1,5—2%, при измерении расстояний, как принято на рис 50, в миллиметрах. Следовательно, Δx необходимо брать тоже в миллиметрах. Величина возможной погрешности в установке датчиков

и радиометра с помощью координатника выбранной конструкции, видимо, не может превышать 0,5 мм. Таким образом, погрешность, обусловленная неточностью в установке, может быть принята равной 1%

Если полагать, что все описанные погрешности подчиняются закону нормального распределения для случайных явлений, а также если исходить из того, что величины измерений и связанных с ними погрешностей будут одинаковыми, то все перечисленные погрешности, обусловленные различными источниками, приведут в результате к средней квадратичной погрешности порядка 3,5%, что соответствует вероятной погрешности порядка 2,5%

С другой стороны, показания датчиков, даже изготовленных в одной партии, могут отличаться друг от друга и от теоретических показаний по следующим причинам. Толщина дополнительной стенки может отличаться от толщины среднего термоэлектрода за счет различной степени сварки двух металлов и взаимного их при этом внедрения. По той же причине могут отличаться теплопроводность материалов и их термо-э. д. с. Т. е. же выводы можно сделать и для датчиков изготовленных металлизацией, гальванопокрытием или пайком. Разным для отдельных датчиков может оказаться эффект обребнения за счет токосъемных проводов или усиков крайних пластин. Различия в показаниях датчиков по этим причинам следует считать систематической погрешностью учитываемой градуировкой. Совпадение градуировочных характеристик, сделанных для разных датчиков в разное время с промежутками до нескольких месяцев, после работы датчика в тяжелых температурных условиях свидетельствуют о правомочности таких предположений.

Характер градуировочной кривой, т. е. зависимости $E=f(q)$ можно предугадать из таких рассуждений (E — разность э. д. с. на гранях датчика, т. е. выходной сигнал). Положим согласно [95, 122] зависимость для теплопроводности промежуточного термоэлектрода от температуры

$$\lambda = \lambda_0(1 + \beta_1 t), \quad (5.3)$$

Для величины термо-э. д. с. примем также наиболее распространенную зависимость

$$E = u_1 t + u_2 t^2. \quad (5.4)$$

Произведем простой расчет

$$q = \frac{\lambda_0}{\delta} (1 + \beta_1 t) \Delta t, \quad (5.5)$$

где Δt — разность температур на гранях промежуточного слоя

Пренебрегая величиной $(\Delta t)^2$, можем записать

$$\frac{\Delta E}{q} = \frac{\delta}{\lambda_0} \cdot \frac{u_1 + 2u_2 t}{1 + \beta_1 t} \quad (5.6)$$

Обозначим

$$\frac{2u_2}{u_1} = \beta_E$$

Пренебрегая зависимостью $\delta = \delta(t)$, соберем члены, не зависящие от t :

$$k = \frac{\delta u_1}{\lambda_0}$$

и получим

$$\frac{\Delta E}{q} = k \frac{1 + \beta_E t}{1 + \beta_1 t} \quad (5.7)$$

или

$$\Delta E = k \frac{1 + \beta_E q}{1 + \beta_1 q}$$

Для выяснения характера градуировочной кривой в зависимости от величин β_E и β_1 необходимо знать из опыта зависимость $q = \tilde{f}(t)$.

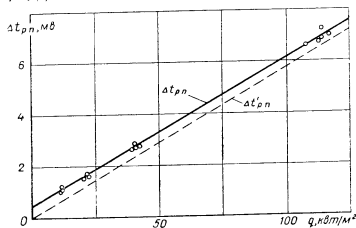


Рис. 51 График зависимости $\Delta t = f(q)$ и $\Delta t' = \tilde{f}(q)$

Градуировку можно производить при различной интенсивности отвода тепла с задней грани датчика. Эта интенсивность в общем может меняться с изменением падающего потока энергии. Выясним зависимость $q = \tilde{f}(t)$ для случая отвода энергии принудительным потоком воздуха. Воспользуемся для этого замерами температуры радиометрических пластин при градуиров-

ке датчиков. Малое термическое сопротивление датчика и одинаковость условий подвода и отвода энергии для радиометра и датчика позволяют производить замену температуры датчика температурой пластины с большой уверенностью. На рис. 51 представлены график $\Delta t'_{p,n} = \tilde{f}(q)$, где $\Delta t'_{p,n}$ — превышение температуры радиометрической пластины над температурой окружающей среды (в мВ).

Опыты производились в разное время с одним и тем же нагнетателем и одной скоростью воздуха. Опытные точки хорошо ложатся на прямую линию. Отрезок на оси температур $\Delta t_{3,1}$, отсекаемый этой прямой, показывает увеличение температуры воздуха за счет охлаждения электродвигателя, вентиляционных потерь и потерь на трение. Из опытных данных легко определить величину коэффициента теплоотдачи от пластинки к потоку воздуха

$$\alpha = \frac{q}{\Delta t'_{p,n}} = 780 \text{ вт/м}^2 \cdot \text{град}, \quad (5.8)$$

где $\Delta t'_{p,n}$ — температурный перепад; $\Delta t'_{p,n} = \Delta t_{p,n} - \Delta t_{3,1}$.

Следовательно, зависимость $q = \tilde{f}(t)$ линейна.

Столь большая стабильная величина α получается за счет того, что на малом участке (8 мм) тепловой пограничный слой не успевает сформироваться. Этому способствует еще и то, что гидродинамический пограничный слой также не успевает стабилизироваться (измерения производятся примерно на $6d$ от входа).

Подставляем в уравнение (5.7) выражение

$$q = \beta_q t.$$

Поскольку $\beta_q = \tilde{f}(t)$, обозначим

$$k_1 = \frac{\delta u_1 \cdot \beta_q}{\lambda_0}$$

и получим

$$\Delta E = k_1 \frac{1 + \beta_E t}{1 + \beta_1 t} \quad (5.9)$$

Из уравнений (5.7) и (5.9) видно, что только при $\beta_E = \beta_1$ или $\beta_1 = \frac{2u_2}{u_1}$, зависимость $\Delta E = f(q)$ или $\Delta E = \tilde{f}(t)$ линейна. При $\beta_E > \beta_1$ график $\Delta E = f(q)$ имеет выпуклость вниз, и наоборот

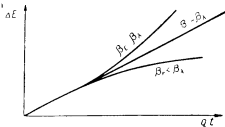


Рис. 52 Характер градуировочной кривой датчика

(рис 52) При достаточно больших β_0 зависимость сохраняется, но становится очень слабо выраженной.

В датчиках с большим термическим сопротивлением величина $(\Delta t)^2$ в уравнении (5.6) пренебрегать нельзя.

40. РЕЗУЛЬТАТЫ ГРАДУИРОВКИ ПАРТИИ ПЛАТИНО-КОНСТАНТАНОВЫХ ДАТЧИКОВ

Исходя из изложенного, приведем обработку данных градуировки партии из 30 шт платино-константановых датчиков.

Материал, который пошел на изготовление датчиков — платина листовая и в проволоке с чистотой 99,9%, а также лента из технического константана. Литературные данные о константане разноречивы также в смысле его состава — по различным данным $\text{Cu}=54-60\%$, $\text{Mn}=0-1,5\%$, $\text{Ni}=35-40\%$ [95, 134]. Почти нет данных о термо-ЭДС константана в паре с платиной $3,5 \text{ мВ}$ при $t=100^\circ\text{C}$ и $t_0=0^\circ\text{C}$, по данным Преображенского [71].

Для β константана мы нашли значение $\beta = 0,0023 \frac{1}{\text{град}}$ [134].

Поэтому мы не смогли аналитически найти температурную поправку для зависимости $\Delta E = f(q)$. Считаем, что она будет одинакова для всей партии датчиков. Поэтому выбрав теоретическую чувствительность датчиков $\frac{\Delta E}{q}$ при каком-либо значении q_A , совместим градуировочные кривые датчиков, умножая

каждое опытное значение ΔE_i на величину $\left(\frac{\Delta E}{\Delta E_i}\right)_{q=q_A}$ при всех значениях q . Здесь индекс i означает номер датчика. В данном случае $i=1-30$, $q=0-10^5 \text{ вт/м}^2$. Значения $\left(\frac{\Delta E}{\Delta E_i}\right)_{q=q_A}$ при $q_A=80000 \text{ вт/м}^2$ для толщины промежуточного слоя 0,6–0,8 мм лежат в пределах 1,0–1,5.

Разброс опытных точек от средних кривых для всех 30 датчиков укажет на максимально возможную погрешность градуировки партии датчиков. На рис. 53 представлены результаты градуировки всей партии датчиков, отдельно для каждого датчика. Цифры у графиков означают порядковый номер датчика. Условные значки для датчиков одинаковы, отличаются они лишь для различных датчиков, проведенных после проверки работы отдельных датчиков в разных условиях, в том числе при рабочих температурах вплоть до 600°C . На рис. 54 результаты градуировки сведены по описанной выше методике. Так как (рис. 54) градуировка производилась в интервале температур 30–200°C, вид обобщенной градуировочной кривой позволяет сделать вывод, что для примененной пары металлов существует

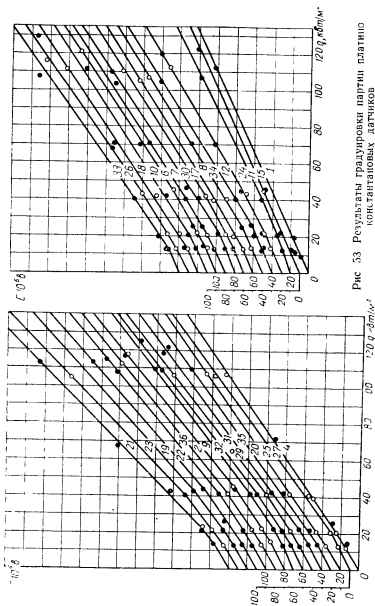


Рис. 53 Результаты градуировки партии платино-константановых датчиков

зависимость $\beta_F > \beta$, или $\beta_A < \frac{2u_2}{u_1}$. Количественно это соотношение можно будет определить лишь после накопления большого опыта с одними и теми же материалами

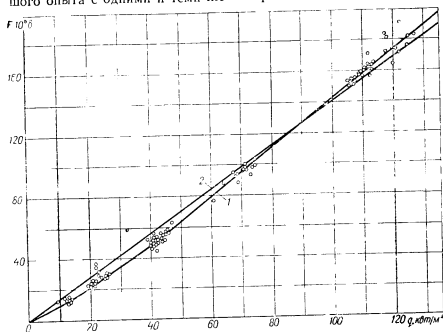


Рис 54 Обобщенный график зависимости $E=f(q)$ для платино-константановых датчиков.

1 — по экспериментальным данным, 2 — по расчетным данным

Обработка данных градуировки (рис. 54) методом наименьших квадратов показывает, что зависимость $\Delta E=f(q)$ может быть выражена следующим уравнением:

$$\Delta E = (0,327 \cdot 10^{-3} + 0,101 \cdot 10^{-4} t - 0,292 \cdot 10^{-7} t^2) q \text{ вт} \cdot \text{м}^2. \quad (5.10)$$

Максимальная погрешность градуировки партии из 30 датчиков при этом определяется в 6%, наиболее вероятная погрешность не превышает 2,5%.

Для сравнения на рис. 54 приведена зависимость, подсчитанная аналитически следующим образом:

$$q_A = \frac{\lambda}{\delta} \Delta t_A; \quad \Delta t_A = \frac{q_A \delta}{\lambda}; \quad \Delta E = u_1 t.$$

Принимаем $\lambda = 20 \text{ вт} / \text{м}^2$ [95]. Зависимость $\Delta E=f(t)$ принята условно линейной. Значение u_1 взято из [71], $u_1 = 3,5 \cdot 10^{-5} \text{ в} / \text{град}$

Для выяснения возможности замены платины в датчиках на потоки до $10^5 \text{ вт} / \text{м}^2$ медью была изготовлена и проградуирована партия из 10 датчиков. Промежуточный термоэлектрод сделан штамповкой из константановой ленты толщиной 0,8 мм крайние слои — гальванопокрытием медью или приваркой на точечной машине медных штампованных пластинок толщиной около 0,05 мм. Токосъемные проводники из электротехнической медной проволоки толщиной 0,1—0,3 мм приваривались к константану до покрытия его гальванически или приварки крайних слоев или к медным пластинкам с выводом концов через щель в константановом диске (см. табл. 1, № 1,9). Щель затем заделывалась различными замазками: кварцевой пудрой, разведенной на жидком стекле или лаке ФГ-9, каолином на жидком стекле и т. д. Концы проводников у датчика покрывались распушенным асбестом или заключались в «чулочек» из стекловолокна.

В заграничной практике медь-константановая терпара является стандартной, и поэтому для определения характера зависимости $\Delta E=f(q)$ можно воспользоваться соответствующими данными. Гардон [110] приводит такое выражение для функции $E=f(t)$:

$$E = 0,0387 t + 0,444 \cdot 10^{-4} t^2 - 27 \cdot 10^{-7} t^3 \text{ мв}. \quad (5.11)$$

Третьим членом в t^3 в интервале температур до 200°C можно пренебречь, так как неточность не превысит 2,3%.

В таком виде это выражение соответствует принятому нами для анализа формы кривой $\Delta E=f(q)$, где

$$\beta_E = \frac{2 \cdot 0,444 \cdot 10^{-4}}{0,0381} = 0,00233.$$

Значение β_A также возьмем из [110] $\beta_A = 0,0023$.

Сопоставив β_E и β_A увидим, что датчик, приготовленный из стандартных меди и константана, имел бы зависимость $\Delta E=f(q)$ с очень слабо выраженной выпуклостью в сторону ΔE . Для нашего случая больших β_q эта кривая с точностью до 2% совпала бы с прямой линией, т. е. практически $\Delta E \approx f(t)$.

На рис 55 представлены результаты градуировки всех 10 датчиков. Экспериментальные точки почти всех датчиков хорошо ложатся на прямую линию, что свидетельствует об одинаковом соотношении β_E и β_A для использованных нами материалов, и приведенных в литературе.

Для некоторых из датчиков при хорошем попадании всех опытных точек на прямую линию эта прямая несколько не про-

ходит через начало координат. Это может объясняться возникновением химического источника тока в месте заделки щели в датчике (например, за счет жидкого стекла), постоянный по-

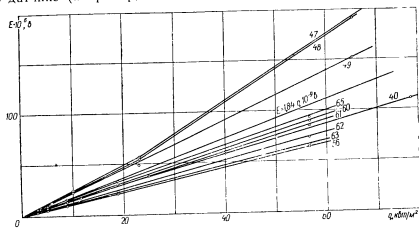


Рис 55 Результаты градуировки партии медно-константановых датчиков

сторонней помехой для данной серии опытов или, наконец, простым дрейфом нуля гальванометра М-195/2 на два-четыре деления в сторону отрицательных тепловых потоков. Предположив для простоты последнее, при корреляции данных перенесем прямые в начало координат, что при потоке в $5 \cdot 10^4$ вт/м² может привести к погрешности в 1—2%

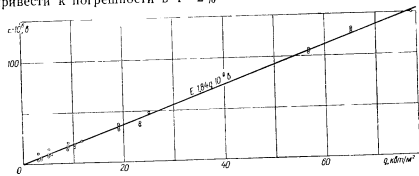


Рис 56 Обобщенный график зависимости $E=f(q)$ для медно-константановых датчиков

На рис 56 данные по градуировке всех 10 датчиков совмещены по той же методике, что и для платино-константановых датчиков. Обработка экспериментальных данных методом наименьших квадратов показывает, что опытные точки ложатся на прямую линию с максимальным отклонением от нее в 3,5%

Для сравнения приведена расчетная кривая по указанным выше данным для американской стандартной медь-константановой термопары.

42. БАТАРЕЙНЫЕ ДАТЧИКИ ГАЛЕТНОГО ТИПА

Под таким названием мы объединяем группу батарейных датчиков (15—120 шт.), изготовляемых из константановых брусочков и медных перемычек между ними и заключенных в металлический кожух (см. табл. 2, № 1). Диаметр датчика 25—35, толщина 1,5—2 мм.

Приведем результаты градуировки первых двух батарейных датчиков с числом элементарных датчиков $n_1=50$ и $n_2=84$ и толщиной их соответственно 0,8 и 1 мм. Эти датчики предназначались для прибора по определению теплофизических характеристик изоляционных материалов, что и установило интервал тепловых потоков и способ градуировки. Вторичным прибором при градуировке и использовании датчиков служил гальванометр М-195/2 с внутренним сопротивлением 111 ом и чувствительностью $4 \cdot 10^{-9}$ а/дел. Для увеличения пределов измерения по потоку в цепь гальванометра последовательно включались манганиновые сопротивления 115 ом (для диапазона $\times 2$) и в паре с ним 345 ом (для диапазона $\times 5$). Сопротивление датчика — 4 ом. С помощью этих добавочных сопротивлений датчики были проградуированы для тепловых потоков величиной до 2 квт/м² (большой) и 3 квт/м². Как видно из рис 57, в этих пределах градуировки опытные данные удовлетворительно ложатся на прямую линию (максимальное отклонение 6% — одна точка). Для тепловых потоков величиной более 3 квт/м² заметно небольшое искривление характеристики в сторону уменьшения чувствительности датчика. Поскольку эти датчики впоследствии рабо-

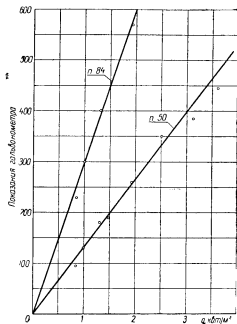


Рис 57 Результаты градуировки батарейных датчиков галетного типа с гальванометром

гали только в паре с одним гальванометром М-195/2, по оси ординат оставлены деления прибора без перевода в милливольты.

Приведем также градуировочную характеристику датчика, предназначенного для измерения локальных кондуктивных тепловых потоков на установке одного из предприятий. Чувствительный элемент прибора изготовлен из 114 элементарных датчиков. Градуировался он на массивной металлической коробке, охлаждаемой проточной водой и укрепленной на кронштейне-координатнике.

В качестве регистрирующего прибора к датчику был использован высокоомный потенциометр Р-307 с нуль-гальванометром М-195/2 на рис 58 показан градуировочный график. Верхним пределом градуировки для этого датчика здесь уже является $8 \cdot 10^3 \text{ вт/м}^2$. При потоках больших $3 \cdot 10^3 \text{ вт/м}^2$ заметно

также некоторое снижение чувствительности датчика, т. е. отклонение от прямолинейности. Однако в этом интервале оно незначительно — для потока в $6 \cdot 10^3 \text{ вт/м}^2$ снижение чувствительности составляет по сравнению с потоком в $3 \cdot 10^3 \text{ вт/м}^2$ всего 3,7%.

Обработка данных показывает, что максимальный разброс данных для кривой линии составляет $\pm 3\%$, а для прямой во всем интервале $\pm 6\%$. Небольшое снижение чувствительности может происходить за счет изменения характеристик заполнителя пустот датчика (клея 88).

43. БАТАРЕЙНЫЕ ДАТЧИКИ СПИРАЛЬНОГО ТИПА

Из серии этих датчиков до градуировочных испытаний и практического использования доведены только пружинные датчики (см. табл. 2, № 4, 5). Первые датчики с кратностью около

600 и 1000 (размеры датчиков в металлическом кожухе $12 \times 1,2$ и $15 \times 1,5 \text{ мм}$) были проградированы наклеенными на водоохлаждаемую коробку на тепловые потоки до $9 \cdot 10^3 \text{ вт/м}^2$.

Вторичным прибором для датчиков был милливольтметр типа ГНКП, имеющий две шкалы в милливольттах и в градусах для хромель-алюмелевой термопары. Использование этого прибора наглядно показало, что сигнал, развиваемый пружинным датчиком при тепловом потоке в $5 \cdot 10^3 \text{ вт/м}^2$, соответствует сигналу хромель-алюмелевой термопары, горячей спай которой находится при температуре в $250\text{--}400^\circ\text{C}$. Это свидетельствует о том, что характеристика выходного канала вполне позволяет подойти к решению задачи по исследованию локального теплообмена во вращающихся деталях, так как сигнал горячей спая термопары при 250°C передается существующими типами токосъемников с достаточно высокой точностью.

Из рис. 59 видно, что датчик с $n \approx 600$ имеет прямолинейную градуировочную характеристику с разбросом не более 1%. Датчик с $n \approx 500$ имеет большой разброс ($\pm 8\%$). Этот датчик был подвергнут повторной градуировке через месяц с тем же вторичным прибором. При этом опытные точки легли немного выше (в области больших тепловых потоков), чем при первой градуировке. Это может свидетельствовать о том, что либо первый раз датчик был недостаточно плотно приклеен к теплоотводу, либо за время между градуировками заполнитель (клей 88) подсох, что увеличило концентрацию линий теплового потока металлом термоэлектродов. Впоследствии обе возможные при-

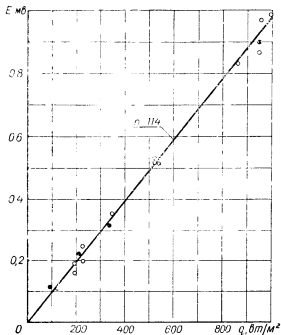


Рис 58 Градуировочный график галетного датчика с потенциометром

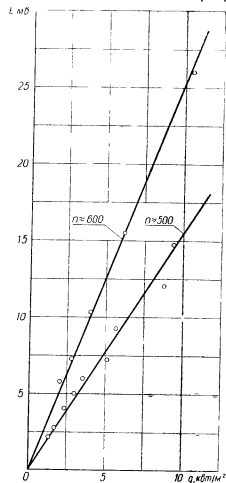


Рис 59 Градуировочные графики спиральных датчиков с милливольтметром

чины учитывались при работе с датчиками и все они проходили испытание на старение. Новые датчики с кратностью порядка 10^3 градуируются с потенциометром типа Р-307.

44. ИСКАЖЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ КАРТИНЫ ИССЛЕДУЕМОГО ТЕЛА, ВНОСИМОЕ ДАТЧИКОМ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА. МЕТОД ЭТА

При исследовании локального теплообмена с помощью датчика теплового потока его теплофизические свойства могут существенно отличаться от свойств материала испытываемого изделия. Поэтому, несмотря на малые размеры, датчик может как-то исказить тепловую картину. Подобные явления возникают и при измерении температуры твердого тела различного рода термометрами. Обычно при определении погрешности измерения температуры, например, термопарой за счет паза для термопары, условия сводят к характерным для плоской задачи [62], т. е. полагают, что паз имеет вид бесконечной прямолинейной канавки. В первом приближении паз считается заполненным нетеплопроводным материалом. Для таких условий В. Е. Минашин и др. [62] получили решение уравнения теплопроводности аналитическим путем при граничных условиях 1-го рода, а также численные решения при условиях 3-го рода. Кроме того, они получили решения для пазов сложного сечения методом электроаналогии (также при отношении теплопроводности тела и пазов, равном бесконечности).

Имеющиеся в литературе попытки получить решение эллиптического уравнения для осесимметричной задачи [100, 119] аналитически также предполагают цилиндрическое сверление под термопару нетеплопроводным. Аналогичная задача для электростатического поля решена Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшицем [55].

Исследовать влияние отношения теплопроводности датчика и испытываемой детали на погрешность в сигнале датчика за счет искажения линий теплового потока аналитическими методами нельзя, так как решение эллиптического уравнения с переменными коэффициентами, хотя в принципе и осуществимо, практически содержит непреодолимые препятствия.

Необходимость в определении степени возмущения картины теплового потока датчиком возникла в связи с изготовлением партии датчиков для определения локальных тепловых потоков в толще изоляционного материала. По теплопроводности этот материал может существенно отличаться от материала датчика, поэтому в районе заделки датчика неизбежно некоторое перераспределение линий теплового потока и, соответственно изотерм. Если теплопроводность датчика λ_2 больше, чем теплопроводность материала λ_1 , линии теплового потока должны «притягиваться» датчиком. Таким образом, через датчик будет

проходить больший тепловой поток, чем в том же месте материала без датчика. Сигнал датчика окажется завышенным.

Степень повышения сигнала за счет датчика можно представить себе как отношение сечения трубки тока без датчика к сечению той же трубки тока с датчиком. Выбранная трубка тока, естественно, должна пронизывать датчик.

Интегрально по датчику эффект присутствия может быть оценен посредством коэффициента

$$k = \frac{d_w^2}{d_x^2},$$

где d_x — диаметр датчика, d_w — диаметр трубки тока, заполняющей потоком весь датчик на таком удалении, где возмущающее влияние датчика равно нулю.

Все приведенные ниже соображения применимы только в простейших случаях, когда при отсутствии датчика линии тока во всей окрестности параллельны между собой.

Для того чтобы определить зависимость коэффициента k от отношения теплопроводностей материалов датчика и его окрестности, воспользуемся методом аналогии. Наиболее простым и удобным в данном случае стационарной задачи является метод электротеплоаналогии (ЭТА). Для получения картины возмущения больше всего подходит моделирование на электропроводной бумаге. В настоящее время с помощью интеграторов ЭГДА, использующих при моделировании электропроводную бумагу, решено очень большое количество задач гидромеханики, теплотехники, электронной оптики и т. д. Однако большинство этих задач двумерные или плоские. Наша же задача решения эллиптического уравнения Лапласа осесимметричная (датчик является отрезком цилиндра диаметром d_x).

П. Ф. Фильчаков [91] предложил методику моделирования осесимметричных задач на электропроводной бумаге, основанную на следующем свойстве уравнения Лапласа в цилиндрических координатах. Запишем это уравнение.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0. \quad (5.12)$$

Его можно представить в эквивалентном виде:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (5.13)$$

и моделировать на электропроводной бумаге как для случая плоской задачи, с условием, что электропроводность бумаги в направлении z постоянна, а в направлении r меняется по линейному закону

$$\sigma_z = \text{const}; \quad \sigma_r = kr \quad (k_1 = \text{const}). \quad (5.14)$$

В работе [91] изложен способ получения бумаги с анизотропной проводимостью, отвечающей условиям (5.14). Автор рекомендует склеивать последовательно листы электропроводной бумаги и выдерживать условия (5.14) ступенчато и показывает достаточно высокую точность, которую обеспечивают этим приемом, при решении различных осесимметричных задач. Однако в нашем случае использование этой методики привело бы к необходимости создать несколько образцов такого электропроводного картона (моделирующего материала, в который помещается датчик) и вклеить в него образцы другого картона с резко отличной проводимостью, также удовлетворяющего условиям (5.14). Без достаточного навыка пространственный эффект, вызываемый значительной толщиной обоих листов картона и необходимостью их склейки между собой, привел бы к искажению картины распределения линий теплового потока или изотерм. Поэтому пришлось воспользоваться упрощенной схемой, представив датчик в виде бесконечно длинной стержня шириной d_x и толщиной δ т. е. перейти к плоской задаче. Для такой схемы коэффициент искажения линий теплового потока (отношение сечений) будет составлять

$$k = \frac{d_w}{d_x}$$

Зависимость $k = f\left(\frac{\lambda_x}{\lambda_w}\right)$ определена на интеграторе ЭГДА-9/60

[92]. Этот универсальный интегратор служит для решения методом электроанalogии двумерных задач, описываемых уравнением эллиптического типа

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[A_1(x, y) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[A_2(x, y) \frac{\partial u}{\partial y} \right] = 0, \quad (5.15)$$

коэффициенты которого суть кусочно-постоянные функции, т. е. сохраняют постоянное значение на достаточно больших участках площади. В нашем случае $A_1 = A_2 = \lambda$ и являются постоянными на участке исследуемого материала (λ_w) и на участке датчика (λ_d). С помощью этого интегратора можно реализовать граничные условия 1, 2 и 3-го рода. Данная задача имеет граничные условия 1-го рода, т. е. задаются постоянные значения температуры на плоскостях, достаточно удаленных от места размещения датчиков. На расстоянии в 10δ заделка датчика даже при $\frac{\lambda_x}{\lambda_w} > 100$ не оказывает влияния. При использовании

граничных условий первого рода на контурные линии модели накладываются шины и на них подаются потенциалы, пропорциональные температурам на границах. При электромоделиро-

вании выдерживаются также геометрическое подобие и подобие проводимостей бумаги, т. е.

$$\lambda_w : \lambda_d = \frac{1}{\rho_w} : \frac{1}{\rho_d}, \quad (5.16)$$

где ρ — удельное сопротивление бумаги

Эти условия осуществляются изготовлением из бумаги образца, подобного части исследуемого тела, с вклейкой в него образца, подобного по сечению датчику, и имеющего проводимость, удовлетворяющую условию (5.16). Далее при помощи делительного устройства измерительной схемы интегратора можно определить на модели линии равного потенциала, соответствующие изотермам натурального образца. При этом интересующие нас линии теплового потока, нормальные к изотермам, приходится строить графически, что неудобно и неточно. Методика моделирования на электропроводной бумаге позволяет находить и непосредственно линии теплового потока с помощью решения обращенной задачи, так называемой аналогии В [92]. Изотермы и линии теплового потока образуют ортогональную систему. Граничное условие $t_y = \text{const}$ можно заменить эквивалентным ему усло-

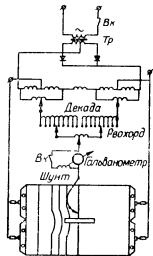


Рис. 60 Схема интегратора ЭГДА-9/60.

нием $\frac{dq}{dy} = 0$, и наоборот. Поэтому можно обратить нашу задачу с граничными условиями $t_x = \text{const}$ и $\frac{dq}{dy} = 0$ (последнее условие

осуществляется простой воздушной изоляцией краев бумаги, параллельных линиям теплового потока — линиям тока) на $t = \text{const}$ и $\frac{dq}{dx} = 0$. Подобие проводимостей при этом также

должно быть обращено, т. е. $\lambda_w : \lambda_d = \rho_w : \rho_d$. Изотермы (эквипотенциалы), полученные при решении обращенной задачи, будут соответствовать линиям теплового потока для прямой задачи. Построение полной сетки изолиний получается поочередным решением обеих задач на одном поле.

На рис. 60 представлена схема интегратора ЭГДА-9/60 и модели. Шины расположены как для решения обратной задачи.

Электропроводная бумага имеет электронную проводимость поэтому измерения проводятся на постоянном токе, что обеспечивает высокую точность Интегратор ЭРДА-9/60 представляет

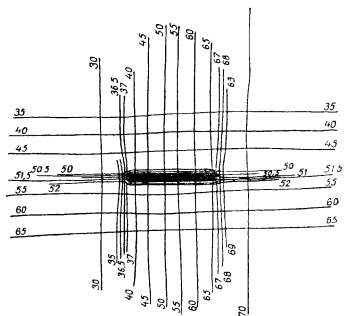


Рис 61 Сетка изолинии при $\lambda_2/\lambda_m = \infty$.

собой измерительный мост постоянного тока с выпрямителем для питания от сети переменного тока Измерительное устройство состоит из градуированного потенциометра, составляющего два плеча моста, и гальванометра — индикатора равновесия моста. Два других плеча моста составляют модель задачи. Геометрическое место точек равных потенциалов, составляющих эквипотенциали, отыскивается с помощью индикатора равновесия Уровень эквипотенциали задается на потенциометре

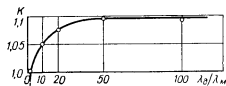


Рис 62 График зависимости

$$k = f\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_m}\right).$$

Для отношений $\frac{\lambda_2}{\lambda_m} = 10$ и $\frac{\lambda_2}{\lambda_m} = \infty$ были решены и прямая и обратная задачи, т.е. вклеивались полоски бумаги, подобные

сечению датчика и имеющие $\rho_2 = 10\rho_m$ и $\rho_2 = \frac{\rho_m}{10}$, или, соответственно, металлическая пластинка, которая для обращенной задачи вырезалась вместе с бумагой модели. Для этих случаев построена полная сетка линий функций тока и потенциала (рис 61). Для остальных $\frac{\lambda_2}{\lambda_m}$ решалась только обратная задача, т.е. отыскивались непосредственно линии теплового тока. Отношение $\frac{d}{\delta}$ было принято равным 10. Величина k определялась непосредственным измерением и бралась как средняя из четырех измерений.

На рис. 62 представлен график зависимости $k = f\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_m}\right)$. Из графика видно, что зависимость эта достаточно быстро приближается к постоянной величине $k = 1,1$.

45. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ, ВНОСИМЫХ ДАТЧИКОМ, ЧИСЛЕННЫМ МЕТОДОМ

Зависимость $k = f\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_m}\right)$, полученная методом ЭТА, пригодна

для двумерной задачи, т.е. для случая, когда датчик представляет собой бесконечный стержень толщиной δ и шириной d . Проверку возможности перехода к круглому датчику, т.е. к осесимметричной задаче, пришлось осуществить с помощью численного решения. Счет велся только для одного значения $\frac{\lambda_2}{\lambda_m} = 50$ с гарантией попадания в зону $k = \text{const}$ (рис. 62).

Условия задачи аналогичны изложенным в предыдущем параграфе. Запишем их для цилиндрических координат

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} = 0, \quad (5.17)$$

при граничных условиях

$$\theta(r, z)|_{z=0} = t_1 = \text{const},$$

$$\theta(r, z)|_{z=h} = t_2 = \text{const},$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_{r=R} = 0.$$

Задачу решаем методом элементарных балансов [63]. Оба тела — исследуемое и датчик — разбиваются на элементарные объемы в виде колец толщиной Δr и высотой Δz (рис 63). При-

няв температуру какой-либо окружности кольца t за расчетную. получим выражение для температуры колец, отстоящих от этой окружности на Δr и Δz : $t_{z-\Delta z}$; $t_{z+\Delta z}$; $t_{r-\Delta r}$; $t_{r+\Delta r}$.

К каждому элементарному объему применим закон подвода тепла теплопроводностью. Процесс считается стационарным и коэффициент теплопроводности для данного материала не зависит от координат и температуры.

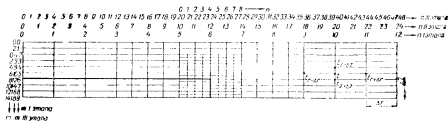


Рис 63 К решению задачи о возмущении методом элементарных балансов

Количество тепла, вошедшего в элемент через верхнюю поверхность кольца:

$$Q_I = -\lambda_I \frac{t - t_{z-\Delta z}}{\Delta z} S_I = -\lambda_I \pi 2n \frac{\Delta r^2}{\Delta z} (t - t_{z-\Delta z}),$$

так как

$$S_I = \pi (r_n^2 - r_{n-1}^2) = \pi \left[\left(r_n + \frac{\Delta r}{2} \right) \left(r_n - \frac{\Delta r}{2} \right) \right] \times \\ \times \left[\left(r_n + \frac{\Delta r}{2} \right) - \left(r_n - \frac{\Delta r}{2} \right) \right] = \pi 2r_n \Delta r = \pi 2n \Delta r^2 \quad (n \neq 0).$$

Аналогично количество тепла, вошедшего в элемент через нижнюю поверхность кольца:

$$Q_{II} = -\lambda_{II} \frac{t - t_{z+\Delta z}}{\Delta z} S_{II} = \lambda_{II} \pi 2n \frac{\Delta r^2}{\Delta z} (t - t_{z+\Delta z}).$$

Количество тепла, вошедшего через внутреннюю боковую поверхность:

$$Q_{III} = -\lambda_{III} \frac{t - t_{r-\Delta r}}{\Delta r} S_{III} = -\lambda_{III} \pi (2n-1) \Delta z (t - t_{r-\Delta r}),$$

так как

$$S_{III} = 2\pi r \Delta z = 2\pi \left(r_n - \frac{\Delta r}{2} \right) \Delta z = 2\pi \left(n \Delta r - \frac{\Delta r}{2} \right) \Delta z = \pi \Delta r \Delta z (2n-1).$$

Аналогично количество тепла, вошедшего через внешнюю боковую поверхность:

$$Q_{IV} = -\lambda_{IV} \frac{t - t_{r+\Delta r}}{\Delta r} S_{IV} = -\lambda_{IV} \pi (2n+1) \Delta z (t - t_{r+\Delta r}).$$

Ввиду стационарности процесса $\Sigma Q = 0$, т. е.

$$Q_I + Q_{II} + Q_{III} + Q_{IV} = 0.$$

Ислучае. Все четыре элемента состоят из одного материала, т. е.

$$\lambda_I = \lambda_{II} = \lambda_{III} = \lambda_{IV} = \lambda_n \quad (\text{или } \lambda_n).$$

а) $n \neq 0$

$$-\lambda \pi 2n \frac{\Delta r^2}{\Delta z} (t - t_{z-\Delta z}) - \lambda \pi 2n \frac{\Delta r^2}{\Delta z} (t - t_{z+\Delta z}) - \\ - \lambda \pi (2n-1) \Delta z (t - t_{r-\Delta r}) - \lambda \pi (2n+1) \Delta z (t - t_{r+\Delta r}) = 0.$$

Сокращая на $\lambda \pi$ и решая относительно t , получим уравнение 1-го типа:

$$t = \frac{\Delta r^2}{2(\Delta r^2 + \Delta z^2)} t_{z-\Delta z} + \frac{\Delta r^2}{2(\Delta r^2 + \Delta z^2)} t_{z+\Delta z} + \\ + \frac{2(n-1)\Delta z^2}{4n(\Delta r^2 + \Delta z^2)} t_{r-\Delta r} + \frac{(2n+1)\Delta z^2}{4n(\Delta r^2 + \Delta z^2)} t_{r+\Delta r}. \quad (5.18)$$

б) $n=0$ — кольцо вырождается в цилиндр, а расчетная окружность в точку, получаем уравнение 2-го типа для определения температуры на оси тела (у элемента три поверхности)

$$t = \frac{\Delta r^2}{2(\Delta r^2 + 2\Delta z^2)} t_{z-\Delta z} + \frac{\Delta r^2}{2(\Delta r^2 + 2\Delta z^2)} t_{z+\Delta z} + \frac{2\Delta z^2}{(\Delta r^2 + 2\Delta z^2)} t_{dr}. \quad (5.19)$$

Ислучае. Соседние элементы состоят из разных материалов.

а) Оба верхних элемента из одного материала, нижние — из другого ($n \neq 0$). При выводе уравнения типа (5.18) необходимо иметь в виду, что

$$\lambda_I = \lambda_n \quad (\text{или } \lambda_n) = \lambda_{II}; \quad \lambda_{III} = \lambda_{IV} = \frac{\lambda_n S_I + \lambda_n S_{II}}{S_I + S_{II}} = \frac{\lambda_n + \lambda_n}{2},$$

как как $S_I = S_{II}$.

Получаем уравнение 3-го типа:

$$t = \frac{\lambda_n}{\lambda_n + \lambda_n} \frac{\Delta r^2}{\Delta r^2 + \Delta z^2} t_{z-\Delta z} + \frac{\lambda_n}{\lambda_n + \lambda_n} \frac{\Delta r^2}{\Delta r^2 + \Delta z^2} t_{z+\Delta z} + \\ + \frac{2n-1}{4n} \frac{\Delta z^2}{\Delta r^2 + \Delta z^2} t_{r-\Delta r} + \frac{2n+1}{4n} \frac{\Delta z^2}{\Delta r^2 + \Delta z^2} t_{r+\Delta r}. \quad (5.20)$$

б) То же для $n=0$ Получаем уравнение 4-го типа:

$$t = \frac{\lambda_M}{\lambda_M + \lambda_A} \frac{\Delta r^2}{\Delta r^2 + \Delta z^2} t_{z-\Delta z} + \frac{\lambda_I}{\lambda_M + \lambda_A} \frac{\Delta r^2}{\Delta r^2 + 2\Delta z^2} t_{z+\Delta z} + \frac{2\Delta z^2}{\Delta r^2 + 2\Delta z^2} t_{zr}. \quad (5.21)$$

в) Оба внешних элемента из одного материала, внутренне — из другого

$$\lambda_{III} = \lambda_M; \quad \lambda_{IV} = \lambda_A; \quad \lambda_I = \lambda_{II} = \frac{\lambda_M S_{I1} + \lambda_A S_{II1}}{S_{I1} + S_{II1}};$$

$$S_I = \pi \left[\left(r_n + \frac{\Delta r}{2} \right)^2 - r_n^2 \right] = \pi \frac{4n+1}{4} \Delta r^2;$$

$$S_{II} = \pi \frac{4n-1}{4} \Delta r^2;$$

$$S_I + S_{II} = \pi 2n \cdot \Delta r^2;$$

$$\lambda_{I,II} = \frac{4n(\lambda_A + \lambda_M) + (\lambda_A - \lambda_M)}{8n}.$$

Подставляя значение λ в уравнение 1-го типа получаем уравнение 5-го типа

$$t = \frac{a_1}{\Sigma a} t_{z-\Delta z} + \frac{a_1}{\Sigma a} t_{z+\Delta z} + \frac{a_2}{\Sigma a} t_{r-\Delta r} + \frac{a_3}{\Sigma a} t_{r+\Delta r}, \quad (5.22)$$

где

$$a_1 = \frac{(4n+1)\lambda_M + (4n-1)\lambda_A}{8n} 2n \frac{\Delta r^2}{\Delta z}; \quad a_2 = \lambda_I (2n-1) \Delta z;$$

$$a_3 = \lambda_M (2n+1) \Delta z.$$

г) Три элемента из одного материала, один — из другого (угол датчика)

$$\lambda_I = \lambda_M; \quad \lambda_{II} = \frac{(4n+1)\lambda_M + (4n-1)\lambda_A}{8n}; \quad \lambda_{III} = \frac{\lambda_M + \lambda_A}{2}; \quad \lambda_{IV} = \lambda_M.$$

Расчетное уравнение принимает вид уравнения 6-го типа

$$t = \frac{a_1}{\Sigma a} t_{z-\Delta z} + \frac{a_2}{\Sigma a} t_{z+\Delta z} + \frac{a_3}{\Sigma a} t_{r-\Delta r} + \frac{a_4}{\Sigma a} t_{r+\Delta r}, \quad (5.23)$$

где

$$a_1 = \lambda_M 2n \frac{\Delta r^2}{\Delta z}; \quad a_2 = \frac{(4n+1)\lambda_M + (4n-1)\lambda_A}{8n};$$

$$a_3 = \frac{\lambda_M + \lambda_A}{2} (2n-1); \quad a_4 = \lambda_M (2n+1).$$

Таким образом исходное дифференциальное уравнение (5.17) заменено системой алгебраических уравнений первой степени (5.18—5.23). Значение искомого функции t будем находить таким образом, чтобы на контуре области она удовлетворяла граничным условиям (5.17), а в каждой внутренней точке определялась из четырех соседних значений при помощи какого-либо из уравнений (5.18—5.23).

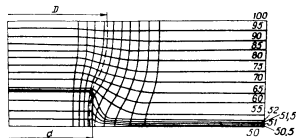


Рис. 64. Изотермы и линии теплового потока для тонкой пластины

Считаем, что в точках каждой окружности температуры равны (требование осесимметричности). Задаем на всех внутренних окружностях принятой разбивки значения температур, взятые из опытов по электро моделированию, и принимаем эту систему за приближение № 1. Решаем систему и получаем приближение № 2 и т. д. Процесс считаем оконченным, когда в пределах заданной точности последующее приближение совпадает с предыдущим — его и считаем решением задачи о поле температур. Проводя ортогональные линии к изотермам, находим линии теплового потока.

Из опытов по электро моделированию видно, что при любом искривлении линии теплового тока полностью прекращается лишь на расстоянии 10% от датчика. Мы не могли сразу принять для разбивки такое расстояние, так как при минимальном числе участков на половине толщины датчика из силу двойной симметрии рассматриваем только четверть датчика (рис. 63), равною трем, общее число участков по оси z составило бы 63. При $R=10r$ в тех же условиях разбивки общее число уравнений составило бы 63², что очень затруднило и замедлило бы подсчет. Поэтому мы воспользовались таким приемом.

Выделяем участок исследуемого тела таких размеров, чтобы на его границах искривление линий теплового потока не превышало 5% (т. е. $k_z = d_z / r_0$; $d_z / r_0 \leq 1,05$). Задав на крайних плоскостях такого участка граничные условия $t=100$ и $t=0$ решим задачу для случая тонкой пластины с заделанным в нее

датчиком, а затем, приняв полученное решение за исходное, будем решать ее и для случая массивной плиты.

Изложенному выше требованию $k_x \leq 1,05$ удовлетворил участок тела с размерами $h=3$ д; $R=2r$ (рис 63)

1 этап Разбиваем рассматриваемую область так

$$M=9, \quad \Delta z = \frac{3}{2} \frac{h}{M} = \frac{1,5}{9} = \frac{1}{6} \text{ мм};$$

$$N=12, \quad \Delta r = \frac{2r}{N} = \frac{10}{12} = \frac{5}{6} \text{ мм};$$

$$t_{12,m} = 100 - \frac{100-50}{3h/2} \Delta z \cdot m = 100 - 50 \frac{m}{9}.$$

Граничные условия:

	<i>m</i>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
<i>n</i>		12	100	95	89	83	78	72	67	61	56	50

	<i>n</i>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
<i>m</i>		0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	9	9	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	

Система уравнений такова:

$$1) \quad t_{n,m} = \frac{100}{208} (t_{n,m-1} + t_{n,m+1}) + \frac{2n-1}{4n} \frac{8}{208} t_{n-1,m} +$$

$$+ \frac{2n+1}{4n} \frac{8}{208} t_{n-1,m}$$

$$n=1, 2, 3, 4, 5, \quad n=6,$$

$$m \neq 6, \quad m \neq 6, 7, 8;$$

$$2) \quad t_{0,m} = \frac{100}{216} (t_{0,m-1} + t_{0,m+1}) + \frac{16}{216} t_{1,m}$$

$$m \neq 6;$$

$$3) \quad t_{n,6} = \frac{25}{51 \cdot 27} t_{n,5} + \frac{50 \cdot 25}{51 \cdot 27} t_{n,7} + \frac{2n-1}{4n} \frac{1}{26} t_{n-1,6} + \frac{2n+1}{4n} \frac{1}{26} t_{n-1,6} \quad (5.24)$$

$$n=1, 2, 3, 4, 5;$$

$$4) \quad t_{0,6} = \frac{25}{51 \cdot 27} t_{0,5} + \frac{50 \cdot 25}{51 \cdot 27} t_{0,7} + \frac{2}{27} t_{1,6};$$

$$5) \quad t_{0,m} = 61002^{-1} [29375 (t_{0,m-1} + t_{0,m+1}) +$$

$$+ 2200t_{5,m} + 52t_{r,m}]$$

$$m=7,8;$$

$$6) \quad t_{0,6} = 31749^{-1} [1200t_{0,5} + 29375t_{0,7} - 1122t_{5,6} + 52t_{r,6}].$$

Задаемся приближением № 1 (табл. 3).

Таблица 3

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0
90	90	91	91	92	92	93	93	94	94	95	95	95	1
84	84	85	85	86	86	87	87	88	88	89	89	89	2
78	78	79	79	80	80	81	81	82	82	83	83	83	3
73	73	74	74	75	75	76	76	77	77	78	78	78	4
67	67	68	68	69	69	70	70	71	71	72	72	72	5
61	61	62	62	63	63	65	65	66	66	67	67	67	6
55	55	56	56	57	57	59	59	60	61	61	61	61	7
51	51	52	52	53	53	54	54	55	55	56	56	56	8
50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	9

В результате счета приближение № 13 (табл 4) совпало с приближением № 12 в пределах точности до целых Картина распределения температуры получилась следующая

Таблица 4

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0
93	93	93	93	93	93	93	93	94	94	95	95	95	1
86	86	86	86	86	86	87	87	88	88	89	89	89	2
79	79	79	79	79	79	80	81	81	82	83	83	83	3
71	71	71	71	71	71	72	75	76	77	78	78	78	4
62	62	62	62	62	62	63	70	71	71	72	72	72	5
53	53	53	53	53	53	53	65	65	66	67	67	67	6
53	53	53	53	53	53	53	60	60	60	61	61	61	7
52	52	52	52	52	52	52	55	55	56	56	56	56	8
50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	9

II этап. Уменьшаем Δr и ограничиваем область (рис 64):

$$M=9, \quad \Delta z = \frac{1}{6};$$

$$N=24, \quad \Delta r = \frac{5}{12}.$$

Граничные условия

$m \backslash n'$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
9	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50

$m \backslash n'$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	100	93	86	79	71	62	53	42	31	20
12	50	100	94	88	82	77	71	66	60	56

Система уравнений такова:

$$1) t_{n, m} = \frac{25}{58} (t_{n, m-1} + t_{n, m-1}) - \frac{2n-1}{4n} \frac{8}{58} t_{n, m}$$

$$+ \frac{2n-1}{4n} \frac{8}{58} t_{n, m}$$

$$m \neq 6, \quad m=6, 7, 8,$$

$$n' = 1, 2, 3, 4, 5, \quad n' = 6;$$

$$2) t_{n, m} = \frac{25}{51 \cdot 29} t_{n', 5} + \frac{50 \cdot 25}{51 \cdot 29} t_{n', 4}$$

(5.25)

$$+ \frac{2n-1}{4n} \frac{4}{29} t_{n-1, 6} + \frac{2n-1}{4n} \frac{4}{29} t_{n-1, 1}$$

$$n' = 1, 2, 3, 4, 5;$$

$$3) t_{i, m} = 27750^{-1} [11995(t_{6, m-1} - t_{i, m-1}) - 3680 t_{i, m} + 80 t_{i, m}]$$

$$m = 7, 8,$$

$$4) t_{i, 1} = 72159^{-1} [2400 t_{6, 5} + 59975 t_{6, 7} - 9384 t_{5, 6} + 400 t_{i, 6}]$$

2 и 4 е уравнения остаются такими же, как и на I этапе
 Приближение № 1 в данном случае имеет следующий вид
 (табл. 5)

Приближение № 16 (табл. 6) с точностью до целых совпало
 с приближением № 15
 III этап. Получаем более подробную картину в следующей
 области (см. рис. 64)

$$M=18; \quad \Delta z = \frac{1,5}{18} = \frac{1}{12}$$

$$N=48; \quad \Delta r = \frac{10}{48} = \frac{5}{24}$$

Таблица 5

$m \backslash n'$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0
93	93	93	93	93	93	93	93	93	93	94	94	94	94	1
86	86	86	86	86	86	86	87	87	87	88	88	88	88	2
79	79	79	79	79	79	79	80	80	81	81	81	82	82	3
71	71	71	71	71	71	72	72	74	75	76	76	77	77	4
62	62	62	62	62	62	63	65	65	70	70	71	71	71	5
53	53	53	53	53	53	53	53	65	65	65	65	66	66	6
52	52	52	52	52	52	52	52	60	60	60	60	60	60	7
51	51	51	51	51	51	51	51	55	55	55	55	55	55	8
50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	9

Таблица 6

$m \backslash n'$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0
93	93	93	93	93	93	93	94	94	94	94	94	94	94	1
86	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	89	88	2
79	79	79	79	79	79	79	79	81	82	82	82	82	82	3
71	71	71	71	71	71	71	71	74	76	77	77	77	77	4
62	62	62	62	62	62	62	68	70	71	71	71	71	71	5
53,0	51,9	51,9	51,9	51,9	51,9	51,9	52,0	63	65	65	66	66	66	6
52,0	51,4	51,4	51,4	51,4	51,4	51,4	51,5	58	60	60	60	60	60	7
51	51	51	51	51	51	51	51	54	55	55	55	55	55	8
50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	9

Граничные условия

$m \backslash n'$	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	88	88	88	88	88	88	88	88	88
14	50	50	50	50	50	50	50	50	50

$m \backslash n'$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0	88	84	79	75	71	65	62	60	51,9	51,6	51,4	51,2	51	50,5	50
8	88	85	82	79	76	73	70	68	65	63	60	58	55	52	50

Система уравнений

$$1) t_{n', m} = \frac{25}{58} (t_{n', m'-1} + t_{n', m'+1}) + \frac{2n-1}{4n} \frac{4}{29} t_{n'-1, m'}$$

$$+ \frac{2n+1}{4n} \frac{4}{29} t_{n'+1, m}$$

$$m' \neq 8, \quad m' \neq 8, 9, 10, 11, 12, 13,$$

$$n''=1, 2, 3, \quad n''=4:$$

$$3) t_{n', n''} = \frac{25}{51 \cdot 29} t_{n', n''+1} + \frac{50 \cdot 25}{51 \cdot 29} t_{n', n''-1}$$

$$\frac{2n-1}{4n} \frac{4}{29} t_{n'-1, n''} + \frac{2n+1}{4n} \frac{4}{29} t_{n'+1, n''}$$

$$n''=1, 2, 3:$$

$$5) t_{1, m} = 280734^{-1} [121175(t_{1, m-1} + t_{1, m+1}) + 37600t_{1, m} + 784t_{1, m'}]$$

$$m'=9, 10, 11, 12, 13;$$

$$6) t_{4, n} = 145935^{-1} [4800t_{4, n-1} + 121175t_{4, n} + 19176t_{4, n+1} + 784t_{4, n'}]$$

2 и 4-е уравнения остаются такими же, как и на I этапе. Приближение № 1 в данном случае имеет такой вид (табл. 7)

Таблица 7

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88
84	84	84	84	84	84	85	85	85	85	85	85	85	85	85
79	79	79	79	79	79	80	81	81	82	82	82	82	82	82
75	75	75	75	75	75	77	78	78	79	79	79	79	79	79
71	71	71	71	71	71	74	75	75	76	76	76	76	76	76
65	65	65	65	65	65	70	72	72	73	73	73	73	73	73
62	62	62	62	62	62	68	68	69	70	70	70	70	70	70
60	60	60	60	60	60	66	66	67	68	68	68	68	68	68
51,9	51,9	51,9	51,9	51,9	51,9	62	63	64	65	65	65	65	65	65
51,6	51,6	51,6	51,6	51,6	51,6	60	62	62	63	63	63	63	63	63
51,4	51,4	51,4	51,4	51,4	51,4	56	58	59	60	60	60	60	60	60
51,2	51,2	51,2	51,2	51,2	51,2	56	56	56	58	58	58	58	58	58
51	51	51	51	51	51	54	55	55	55	55	55	55	55	55
50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	51	51	52	52	52	52	52	52	52
50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50

Останавливаем счет на приближении № 28 (табл. 8)

Таблица 8

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88
84	84	84	84	84	84	84	85	85	85	85	85	85	85	85
79	79	79	79	80	81	81	82	82	82	82	82	82	82	82
75	75	75	75	76	77	77	78	79	79	79	79	79	79	79
71	71	71	71	72	74	75	76	76	76	76	76	76	76	76
66	66	66	66	67	70	72	73	73	73	73	73	73	73	73
62	62	62	62	63	66	69	70	70	70	70	70	70	70	70
58	57	57	57	58	63	66	67	68	68	68	68	68	68	68
51,9	51,7	51,7	51,7	51,9	60	63	65	65	65	65	65	65	65	65
51,6	51,6	51,6	51,6	51,7	58	61	62	63	63	63	63	63	63	63
51,4	51,4	51,4	51,4	51,5	56	58	59,5	60	60	60	60	60	60	60
51,2	51,2	51,2	51,2	51,2	54	56	57	58	58	58	58	58	58	58
51	50,9	50,9	50,9	50,9	53	54	55	55	55	55	55	55	55	55
50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	51,5	52	52	52	52	52	52	52	52	52
50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50

Полученные графики изотерм и построенные линии теплового потока для случая тонкой пластины изображены на рис. 65

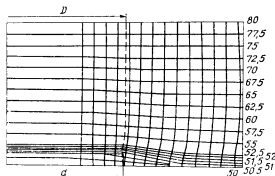


Рис. 65 Изолинии для пластины с $d/h=1$

Это распределение температур было принято за исходное для отношения толщины плиты и датчика, равного 20. Дальнейший подсчет производился по тем же уравнениям и приближением № 24 совпало с точностью до десятых с приближением № 23. Измерение величин d и D (рис. 65) дает значение $k = \frac{D^2}{d^2} = 1,08$,

что достаточно хорошо совпадает с результатами электромоделирования и подтверждает правильность определения величины

k как отношения сечения линии теплового потока, прошедших через датчик, в месте отсутствия искажения и на датчике.

Накопленный опыт счета позволил решить задачу о возмущении тепловой картины твердого тела при размещении датчика на его поверхности (исследование конвективного теплообмена). Соответственно заданию граничных условий 3-го рода:

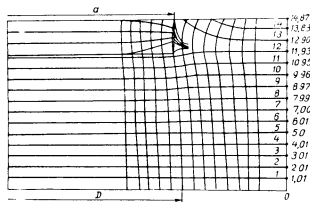


Рис 66 Картина возмущения при расположении датчика на поверхности изделия

уравнениям типа (5.24) пришлось добавить уравнения для точек тела, лежащих на его поверхности (рис 66).

1 Соседние элементы из одного материала

$$t = \frac{a_1}{b} t_{cp} + \frac{a_2}{b} t_{z-\Delta z} - \frac{a_3}{b} t_r - \frac{a_4}{b} t_{r+\Delta r};$$

$$a_1 = \alpha \cdot 2n \cdot \Delta r^2; \quad a_2 = \lambda 2n \frac{\Delta r^2}{\Delta z}; \quad a_3 = \lambda (2n-1) \frac{\Delta z}{2};$$

$$a_4 = \lambda (2n+1) \frac{\Delta z}{2}; \quad b = \sum_{i=1}^n a_i.$$

2 То же для точки на оси

$$t = \frac{a_1}{b} t_{cp} + \frac{a_2}{b} t_{z+\Delta z} - \frac{a_3}{b} t_r - \frac{a_4}{b} t_{r+\Delta r};$$

$$a_1 = \frac{\alpha \Delta r^2}{4}, \quad a_2 = \frac{\lambda \Delta r^2}{4 \Delta z}, \quad a_3 = \frac{\lambda \Delta z}{2}, \quad b = \sum_{i=1}^n a_i.$$

3 Соседние элементы из разных материалов (угол датчика)

$$t = \frac{a_1}{b} t_{cp} + \frac{a_2}{b} t_{z-\Delta z} + \frac{a_3}{b} t_{r-\Delta r} + \frac{a_4}{b} t_{r+\Delta r};$$

$$a_1 = \alpha \cdot 2n \Delta r^2; \quad a_2 = \frac{(4n+1)\lambda_n + (4n-1)\lambda_2}{4} \frac{\Delta r^2}{\Delta z}; \quad (5.27)$$

$$a_3 = \lambda_2 (2n-1) \frac{\Delta z}{2}; \quad a_4 = \lambda_n (2n-1) \frac{\Delta z}{2}; \quad b = \sum_{i=1}^n a_i.$$

В этих уравнениях t_{cp} означает температуру среды на большом удалении от поверхности, α — коэффициент теплоотдачи. Для того чтобы попасть в зону $k = \text{const}$ (по-прежнему $k = \frac{d^2}{d^2}$, где d_∞ — диаметр сечения линий тока в зоне их параллельности, d — диаметр датчика), отношение $\frac{\lambda_2}{\lambda_n}$ было

взято равным 50. Чтобы условия на границе тела существенно отличались от граничных условий 1-го рода, значение критерия $Bi = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$ на датчике было взято достаточно малым $Bi = 0.5 \cdot 10^{-2}$ откуда при $\lambda_2 = 50 \text{ вт/м} \cdot \text{град}$ и $l = 1 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ получаем $\alpha = 25 \text{ вт/м}^2 \cdot \text{град}$.

На противоположной грани пластины, как и в предыдущих случаях, задано постоянство температуры.

Результаты счета приведены на рис 66.

Величина k получилась равной $k = 1.05$, т.е. даже при таком сильно отличающемся граничными условиями случае коэффициент искажения невелик и может в случае необходимости быть легко учтен.

Г Л А В А VI

ПРИМЕНЕНИЕ ДАТЧИКОВ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА В ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

46. ИЗМЕРЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ В ИЗДЕЛИЯХ С $\lambda = 0.2-2.0 \text{ вт/м} \cdot \text{град}$

В 1960—1961 гг. по договорам с исследовательскими предприятиями были начаты разработки, исследования и изготовления малыми сериями приборов для измерения местных тепловых потоков, главным образом для случая заделки датчиков в массу теплоизоляционного материала ($\lambda = 0.2-2.5 \text{ вт/м} \cdot \text{град}$).

По условиям технических заданий заказчиков, интервал измеряемых тепловых потоков составляет $(0,1 \text{--} 1,4) \cdot 10^6 \text{ вт/м}^2$, а рабочая температура датчика может доходить вплоть до 1000°С . Комплект датчиков из 10 шт должен обслуживаться одним регистрирующим прибором, располагающимся на рас-

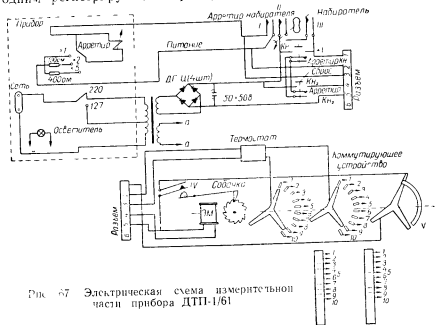


Рис. 67 Электрическая схема измерительной части прибора ДТТИ-1/61

стоянии 8—10 м от датчиков. Те же датчики могли располагаться и на поверхности теплопроводного материала с λ до $80 \text{ вт/м}\cdot\text{град}$.

Согласно техническим заданиям, были изготовлены и испытаны платино-константановые датчики. Технология их изготовления, градуировочные кривые и коэффициенты коррекции за счет разных λ датчика и материала приведены соответственно во разделах 31, 41 и 46. Здесь мы ограничимся рассмотрением вопросов коммутации малых сигналов датчиков и конструктивного оформления аппаратуры [23].

На рис. 67 представлена электрическая схема измерительной части прибора. Вся аппаратура комплектуется в двух агрегатах, соединенных между собой удлинительным проводом с разъёмником (выводы с надписями «Разъём»).

В одном из агрегатов собрано коммутирующее устройство и термостат переходных спаев. Шаговый искатель коммутирующего устройства позволяет подключить одновременно десять датчиков.

Все контакты панели и искателя звездочки и ведущие в термостат проводники выполнены из платины, для предотвращения помех, могущих возникнуть при переключении цепи.

При прокатке заготовок звездочки искателя был подобран режим вальцовки и промежуточных отжигов таким образом, чтобы в окончательном размере заготовка оказалась слегка нагретированной. Это позволило придать звездочкам нужную форму для получения надежного контакта.

Шаговый искатель управляется при помощи телефонного набирателя, помещенного рядом с регистрирующим прибором с агрегате управления. Набиратель имеет десять цифр, соответствующих парам контактов искателя, и при помощи набирателя можно посылать нужное количество импульсов на электромагнитный привод искателя. В управлении шаговым искателем могут участвовать также две кнопки, помещенные под набирателем. Одна из них (на рис. 68 Кн₁) служит для последовательной записи показаний датчиков и посылает при нажатии одиночный сигнал, включающий очередную пару контактов. Вторая кнопка (Кн₂) служит для возвращения искателя в нулевое положение (сигнал на регистрирующем приборе при этом не подается), ее необходимо нажимать перед каждым набором номера датчика при помощи набирателя, а также по окончании работы с прибором (кнопка сброса).

Вся система дистанционного управления, во избежание попадания на чувствительный элемент случайных импульсов, снабжена арретирами, которые закорачивают прибор при срабатывании того или иного органа управления.

В агрегате управления размещен также блок питания, подающий напряжение на коммутирующее устройство и осветитель прибора. Блок питания работает от сети переменного тока 127 или 220 в. Уставка на нужное напряжение производится фрикцией, находящейся под шкалой прибора слева. С помощью находящегося справа под шкалой переключателя устанавливается соответствующий диапазон шкалы или же арретирруется рамка чувствительного элемента. В качестве последнего использован чувствительный элемент гальванометра М-195/2, рамка которого имеет сопротивление 93 ом. Общее сопротивление цепи, включая датчик, удлинительные провода и переходы, составляет 100 ом. Изменение диапазона измерения тепловых потоков достигается простым включением в цепь манганиновых сопротивлений 100 ом (для удвоения показаний шкалы) или 400 ом (показания шкалы увеличиваются в пять раз).

Каждый датчик был проградуирован вместе с агрегатами управления и коммутации, некоторые датчики градуировались повторно после проверки их работы в различных условиях.

При передаче аппаратуры представителям заказчика два датчика, на выбор, были подвергнуты контрольным испытаниям и градуировке, показавшим их удовлетворительно стабильность и достаточно высокую точность измерения

47. ПРИБОР ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ КОНСТАНТ

Возможность измерения с помощью датчиков местных значений достаточно малых потоков тепла, распространяющегося теплопроводностью, позволила нам предложить прибор для опре-

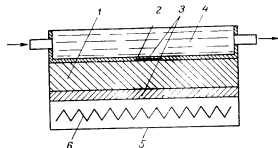


Рис 68 Схема прибора для определения теплопроводности

деления теплофизических констант материалов по методу плоской плиты (рис. 68).

Обычно приборы для исследования материалов с малой теплопроводностью, использующие метод плоской плиты, весьма громоздки. Тепловой поток чаще всего измеряется по расходу энергии электроннагревателем или по нагреву охлаждающей жидкости. Последний способ у нас принят как стандартный (ГОСТ 7076-54). Оба эти способа предполагают наличие охранных калориметров или нагревателей, устройств для контроля отсутствия утечек тепла, мерных баков и т. п. Для каждого испытания обычно требуется 6—8 ч. Использование датчиков теплового потока для измерения тепловых потоков через пластину позволяет уменьшить размер образцов, отказаться от охранных нагревателей или калориметров, существенно сократить время испытаний (с 6—8 ч до 10—45 мин).

Прибор состоит из следующих элементов: пластины испытуемого материала 1, плоского электроннагревателя с регулируемой мощностью 2, выравнивающей пластины из высоко-теплопроводного материала 3 и холодильника с проточной водой 4. В дно холодильника, по центру его, заделан датчик теплового потока 2, а одна из головок дифференциальной термометры 3 для измерения перепада температуры по толщине образца. Второй спай термометры заделан с противоположной стороны образца в цент-

ре горячей плиты. Инерциальная схема включения термометра позволяет производить дифференциальные измерения как разности температур на противоположных гранях образца, так и абсолютных их температур. Поверхность датчика и головки термометра при испытании контактируют с поверхностями испытуемой пластины.

Для установки в прибор наиболее подходят батарейные датчики галетного и пружинного типов. Чувствительность датчиков позволяет проводить испытания на малых значениях теплового потока с целью получения значений λ в достаточно узком диапазоне температур между верхней и нижней границами образца. Это позволяет, в частности, измерять теплопроводности влажных материалов без опасения нарушения поля влажности и теплопроводности за счет пропускания теплового потока.

Диапазон тепловых потоков, измеряемых датчиком, достаточно велик для того, чтобы при фиксированной разности температур измерять теплопроводности теплоизоляционных, строительных и конструктивных материалов. По теплопроводности материал датчика незначительно отличается от материала дна холодильника и поэтому искажения изотермических плоскостей при наличии датчика не происходит.

Работа с прибором для определения λ состоит в следующем: собираются все элементы прибора (требования к контакту на поверхностях обычные, при необходимости применяется теплопроводная смазка — замес толченого графита на поливинилвом лаке и т. п.). Включается нагреватель на мощность, соответствующую примерным значениям средней температуры образца и подается охлаждающая вода. Об установившемся тепловом состоянии судят по неизменяемости показаний датчика, термометры. Показания датчика и термометра регистрируются одним и тем же потенциометром Р-307 или ПП. Скоро будут закончены проработки и выпущен первый промышленный образец прибора описанного типа. В принципе с помощью датчиков теплопроводности можно определять при различных давлениях и газовых средах.

Мы измеряли коэффициенты теплопроводности трех новых изоляционных материалов, представленных одним из промышленных предприятий, на макете прибора. Первым подверглись испытаниям стеклотекстолит. Задача по определению зависимости $\lambda = f(t_{cp})$ для стеклотекстолита была в известной мере контролирующей. Не имея надежных данных для этой зависимости предприятие уже провело серию опытов по исследованию теплообмена с деталями из стеклотекстолита, в том числе опыты по которым имеются многочисленные обработки и данные. Поэтому в первом λ -приборе устанавливались одновременно два датчика и две дифференциальные термометры. Испытуемая пластина имела продолговатую форму для параллельного раз-

мещения двух комплектов измерительных приборов. Датчики менялись местами в разных опытах. В этом приборе были испытаны оба типа батарейных датчиков — галетного и спирального типов. Толщина пластин составляла 2,5; 10 и 17 мм (между

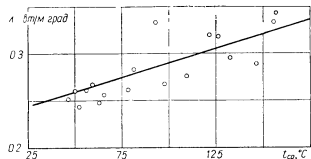


Рис 69. Температурная зависимость теплопроводности для стеклотекстолита

головками термпары), ширина и длина — 100 и 200 мм. Опытные данные по определению теплопроводности стеклотекстолита при прохождении теплового потока поперек волокон стеклоткани приведены на рис 69. В исследованных пределах температур 40–170°C зависимость $\lambda=f(t_{ср})$ можно представить уравнением прямой [28]:

$$\lambda = 0,215 + 0,000756t_{ср} \text{ вт/м} \cdot \text{град.} \quad (6.1)$$

Максимальный разброс опытных точек от прямой, соответствующей этому уравнению, составлял $\pm 12\%$. По свидетельству

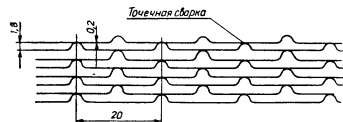


Рис 70. Конструкция стальной изоляции

заказчиков, использование наших данных при обработке их опытов привело к хорошему взаимному совпадению.

Исследование зависимости $\lambda=f(t_{ср})$ было проведено нами также для стальной изоляции. Эскиз ее устройства приведен на рис 70. Диаметр образца составлял 170 мм, толщина 17 мм. Боковая поверхность образца тщательно изолировалась

для предотвращения просачивания воздуха. Кроме того, отсутствие радиального растекания тепла контролировалось также с помощью нескольких термпар, приваренных к горячей и холодной плоскостям образца на различных радиусах. На рис 71

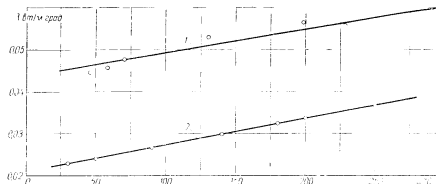


Рис 71. График зависимости $\lambda=f(t_{ср})$ для стальной фольги (1) и воздуха (2)

представлены данные зависимости $\lambda=f(t_{ср})$. Для сравнения приведены также данные для чистого воздуха. В интервале температур 30–300°C зависимость эта может определяться из уравнения прямой линии.

$$\lambda = 0,0436 + 0,000056t_{ср} \text{ вт/м} \cdot \text{град} \quad (6.2)$$

при максимальной погрешности за счет разброса точек не выше чем $\pm 4\%$. Время выхода λ -прибора на стационарный режим при работе со стальной фольгой составляло 30–80 мин.

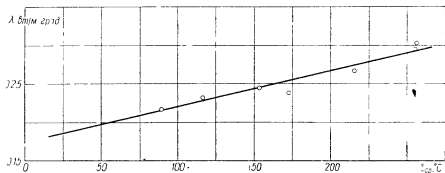


Рис 72. График зависимости $\lambda=f(t_{ср})$ для пеносила

Наконец, на тех же условиях нами исследовалась теплопроводность пеносила с плотностью 0,57 г/см³. Для стальной фольги и пеносила использовались батарейные датчики с кратностью около 100 и чувствительностью порядка 10^{-3} мВ/м²·вт. Реги-

страция сигнала датчиков и терморпар производилась через переключатель одним потенциометром Р-307

Опытные данные для носила (рис 72) также хорошо укладываются на прямую линию с уравнением

$$I = 0.175 + 0.000454t_{cp} \text{ вт/м} \cdot \text{град} \quad (6.3)$$

с разбросом не более 5% (1 точка)

Ввиду малой постоянной времени датчика (около 2—3 сек для батарейного датчика) этим же прибором можно пользоваться и для определения температуропроводности a и, таким образом, из одного опыта получать теплофизические константы λ , a , c

48. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАТЧИКОВ В ТЕРМОГРАФИЧЕСКОЙ КАЛОРИМЕТРИИ

Термографической калориметрии называли Э. Ф. Капустинский и Ю. П. Барский [43] один из методов количественной термографии. Сущность метода заключается в измерении потока тепла в оболочке из малотеплопроводного материала, окружающего со всех сторон исследуемое вещество. Измерение теплового потока при этом производится по методу, аналогичному методу дополнительной стенки, и предполагает известным значение теплопроводности оболочки. Запись разности температур на оболочке и температуры исследуемого вещества позволяет определять различные тепловые эффекты: теплоту фазового превращения, химической реакции и т. д. Этот метод термографии позволяет в принципе осуществлять любой способ нагрева, но обычно применяется в условиях так называемого квазистационарного или линейного режима нагрева. Теория квазистационарного режима разработана А. В. Лыковым [59]. Е. П. Шургина [12] на основе особенностей этого режима впервые осуществила измерение термических характеристик материала способом измерения теплового потока вне образца.

В сборнике [43] приведено описание установки по простейшему исполнению метода термографической калориметрии с заданной разности температур на оболочке, пропорциональной тепловому потоку. Подобная установка осуществлена и в работе О. В. Ривина [72], причем в ней предложено измерять разность температур всего в одном месте калориметра и градуировать установку по электронагревателю. Там же отмечено, что результаты тарировки должны зависеть от формы этого нагревателя.

В подобных установках на точность измерений влияют изменение теплофизических свойств оболочки, геометрические размеры калориметра. Для устранения влияния этих факторов, М. Ш. Ягфаров и Л. Г. Берг [98] предложили измерять разность

тепловых потоков, поступающих в образец и в эталонное вещество (воздух). Установка, созданная Ягфаровым и Бергом, позволяет подводить тепло только по линейному закону.

Ю. П. Барский [8, 9] вводит для методов количественного определения теплофизических констант вещества или его фазового состава при переменном нагреве с помощью измерения величин, пропорциональных q , термин «тепловой анализ». С помощью этих методов могут быть решены различные задачи физико-химического анализа: определение тепловых эффектов, измерение тепловых констант, электропроводности, изменения веса и т. д. В частности, эти методы дают возможность определять теплоты растворения, смачивания и т. п. — процессы сопровождаемые весьма малыми тепловыми эффектами.

Как видно из приведенного краткого обзора, измерение теплового потока в твердом теле начинает интересовать различные отрасли науки. Применение датчиков теплового потока для этой цели позволит существенно упростить установки, отказаться от тарировки каждого из калориметров. Размещение нескольких датчиков в характерных местах калориметра позволит получать как местные, так и средние по прибору значения тепловых потоков.

Нами неоднократно производились измерения тепловых потоков при различных режимах подвода тепла — постоянном ($q = \text{const}$), линейном ($q = kt$) и экспоненциальном ($q = ke^{-at}$). Высокая точность измерения q сохраняется в широком интервале скорости изменения теплового потока и ограничивается лишь величиной постоянной времени (1—3 сек) датчика. Запись результатов производилась вручную со шкалы гальванометра (одиночные датчики), а также с помощью потенциометров типа ЭПП-09 и КВТ1/ЕН (батарейные датчики).

49. ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОНВЕКТИВНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ДО 10^5 вт/м^2 [21]

По договорам с исследовательскими и промышленными предприятиями разработана аппаратура для измерения локальных потоков тепла интенсивностью до 10^5 вт/м^2 при размещении датчиков в теплообменниках на стороне горячих газов или на стороне слабоагрессивной жидкости (морской воды). Благодаря невысокой рабочей температуре датчиков их можно делать медно-константановыми (см. разд. 31, 41). Применение медных токосъемных и удлинительных проводников позволило в значительной мере упростить коммутирующую аппаратуру — отказаться от термостатирования, применить стандартный шаговый искатель и т. д. Так же, как и в приборе, описанном ранее, один регистрирующий прибор с использованием чувствительного элемента гальванометра М-195/2 обслуживает десять одн-

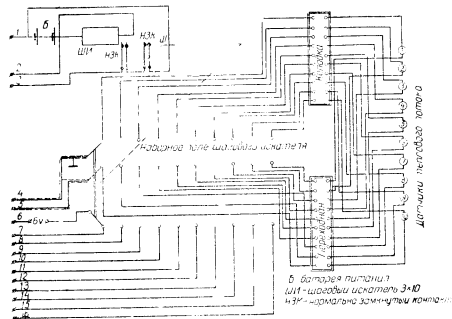


Рис. 73. Схема коммутации аппаратуры ДТТ 1/62

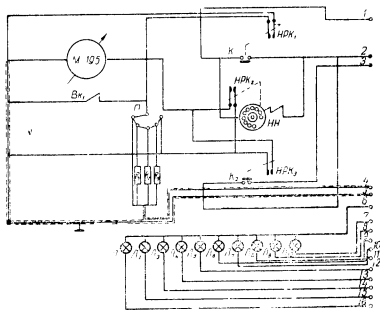


Рис. 74. Электрическая схема агрегатов управления и коммутации ДТТ 1/62

ночных датчиков, расположенных в различных местах теплообменника или изделия.

Регистрирующий прибор располагается в 8—10 м от изделия. Управление шаговым искателем производится номеронабирателем. В схеме управления добавлено табло с десятью цифрами. При включении в цепь регистрирующего прибора того или

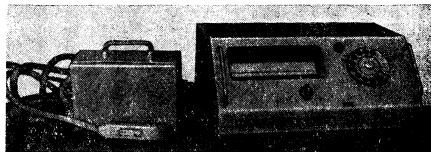


Рис. 75. Внешний вид аппаратуры ДТТ 1/62

иного датчика соответствующая цифра освещается лампочкой. Лампочка питается от трансформатора питания, через третий ряд контактов шагового искателя. На рис. 73 приведена схема коммутации, на рис. 74 — электрическая схема агрегатов коммутации и управления. Внешний вид аппаратуры изображен на рис. 75.

С помощью аналогичных приборов проводятся измерения тепловых потоков конвекцией от расплавленных солей при электролизе их с целью получения галогенов и металлических компонентов (работа проводится совместно с кафедрой общей и теоретической теплотехники Киевского ордена Ленина политехнического института). Существенную роль здесь играют вопросы защиты от агрессивных сред и сильных электрических полей.

50. СКОРОСТНОЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ

Локальное измерение малых тепловых потоков с помощью батарейных датчиков позволяет предложить метод определения эффективности термоизоляции в натуральных условиях на ограждениях, трубопроводах и машинах. По договору с Министерством монтажных и специальных строительных работ УССР, в лаборатории методов тепловых измерений в 1964 г. выпущена партия из 20 приборов, позволяющих осуществить широкую производственную проверку метода. Интервал измеряемых тепловых потоков составляет 50—1000 $вт/м^2$; условия проверки изо-

ляции могут быть тяжелыми для чувствительных гальванометров. Поэтому для такой цели применяются батарейные датчики, градуируемые в паре с достаточно грубыми стрелочными приборами типа милливольтметра.

Датчик толщиной около 1,5 и диаметром 20 мм, будучи приложенным к испытуемой поверхности, практически образует с ней изотермическую поверхность и его присутствие не искажает конвективных потоков воздуха. Единственным источником погрешности измерения теплового потока может стать различие в степени черноты датчика и испытуемой поверхности, так как обмен тепла радиацией может составлять существенную долю конвективного потока тепла. Поэтому необходимо будет подобрать материал или окраску кожуха датчика таким образом, чтобы его поверхность одинаково излучала с испытуемой. В датчик заделывается и обычная гермопара для определения температуры поверхности изоляцией одновременно с тепловыми потерями через нее.

С целью проверки работы датчиков на различных поверхностях, в различном положении (вертикальном, наклонном или горизонтальном), а также для исследования естественной конвекции использована установка типа шаровых калориметров [95]. Она состоит из полый сферы из латуни диаметром 210 мм, с толщиной стенки около 3 мм. Внутренняя поверхность сферы оклеена плоским электронагревателем из пермаллоя толщиной 0,07 мм с изоляцией из полумиллиметрового асбеста. Такое устройство нагревателя позволяет почти без инерции задавать тот или иной тепловой режим на поверхности шара. Нагреватель состоит из 20 сегментов, каждый из которых разрезан так, что образуется ленточка шириной около 2,5 мм. Сегменты соединены между собой последовательно, с расчетом питания их от ЛАТР-1 с максимальной мощностью в 2 кВт при падении напряжения в 220 в. Максимальная расчетная температура на поверхности незащищенного шара — 400°C. Выводы от нагревателя направляются через диаметрально расположенные трубочки диаметром 5/3 мм наружу. Трубочки эти из нержавеющей стали являются опорами шара в координатнике. Шар можно поворачивать и фиксировать в любом положении для трассировки одним и тем же датчиком промежуточных положений от 0 до 2 π рад. Устройство установки и внешний вид ее приведены на рис. 76 и 77. Наружная поверхность шара полирована и хромирована. При необходимости на нее легко накладывать слой той или иной изоляции.

Первые опыты на установке показали хорошую сходимость среднего из локальных значений удельного теплового потока, зафиксированных батарейным датчиком, с удельным потоком, замеренным по расходу электроэнергии.

Исследование возможности измерения малых конвективных тепловых потоков в различных условиях позволяет поставить и без больших трудностей осуществить работу по определению

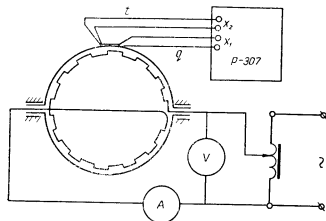


Рис 76 Электрическая схема установки для исследования конвективного теплообмена.

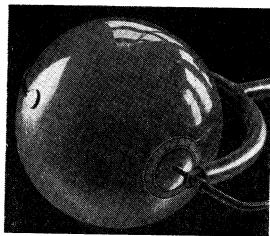


Рис 77 Внешний вид установки для исследования конвективного теплообмена

потерь тепла обмуровкой котельных агрегатов (q_s), что пополнит работы, проводимые в Институте технической теплофизики АН УССР и Институте автоматизации при Госплане УССР по определению потерь в котельных установках [49, 87]

51. ИССЛЕДОВАНИЕ НЭЙСМИТА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ К СТЕНКЕ ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ОБТЕКАНИИ С ОТРЫВОМ

Нам известна лишь одна попытка использования за границей датчика теплового потока — сплюснутой дифференциальной термопары — для исследования локального теплообмена

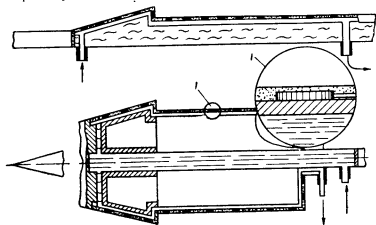


Рис 78 Схема установок Нэйсмита по исследованию конвективного теплообмена

А Нэйсмита на конференции по теплообмену в Лондоне в январе 1962 г. доложил [126] об использовании датчиков с промежуточным слоем из теллуристого серебра, изготовлявшихся фирмой Джоис, Лэбл и К^о (см разд 12), для измерения тепловых потоков к стенке при обтекании ее сверхзвуковым потоком воздуха и срыве течения на наклонной ступеньке.

Нэйсмита провел два эксперимента с плоским клином и с круговым конусо-цилиндром (рис 78). В обеих установках угол наклона $\alpha = \frac{\pi}{12}$ рад, величина ступени — 25,4 мм. Установки охлаждались спиртом. Снаружи металлическая поверхность образцов покрывалась слоем малотеплопроводной эпоксидной смолы (для предотвращения продольного перетекания тепла) с заделанными в нее датчиками размером 10×1,5 мм. Теплопроводность смолы была подобрана одинаковой с материалом датчика путем добавки к ней алюминиевого порошка. Клин установлен на нижней стенке аэродинамической трубы размером 127×127 мм, конусо-цилиндр — в трубе 915×915 мм.

Цель работы Нэйсмита была отыскать положение и определить величину пика в распределении коэффициента теплоот-

дачи, получающегося за счет увеличения давления в вязком слое при повторном соприкосновении оторвавшегося на ступеньке потока со стенкой.

Для этого клин был оборудован 14 датчиками: 5 на наклонной плоскости и 9 — на горизонтальной плоскости после ступеньки. Для второй модели число датчиков было увеличено

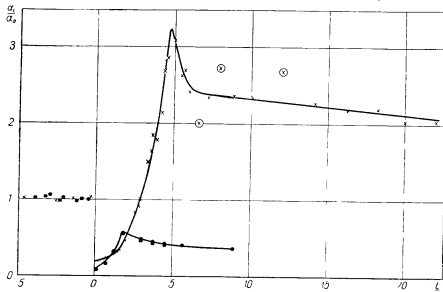


Рис 79 График зависимостей, полученных в результате измерений Нэйсмита

до 49, из них 5 на конической части, 4 — на ступеньке и 40 — на цилиндре. Температура поверхности над каждым датчиком измерялась обычной термопарой. В обеих установках система охлаждения спиртом позволяла поддерживать стабильное состояние модели не более 5 мин. Поэтому, если для клина можно было производить запись вручную с обычного потенциометра, то для конусо-цилиндрической модели запись была автоматизирована с помощью самопишущего потенциометра и электро-механического переключателя.

Условия работы позволили Нэйсмиту провести опыты с клином только для турбулентного пограничного слоя при давлениях торможения 3 и 5 ат (критерий Re порядка 10⁷). В большой установке опыты возможно было провести лишь при низком давлении торможения, что соответствовало небольшим Re, и пограничный слой был ламинарным.

Результаты своих опытов Нэйсмита обработал в виде зависимости $\frac{\alpha}{\alpha_0} = f(l)$, где l — расстояние от ступеньки, отнесенное

к высоте ступеньки, α_0 — коэффициент теплоотдачи на наклонной части модели (до ступеньки) Коэффициенты теплоотдачи определялись из соотношения

$$\alpha = \frac{q}{T_c - T_w},$$

где T_w — температура стенки (измерялась терпарой), T_c — собственная температура стенки (см разд 12). Как и у Слэка [137], здесь T_c определялась экстраполяцией функции $q=f(T_w)$ к условиям нулевого теплообмена. По данным Нэйсмита, зависимость эта имеет вид прямой линии

На рис. 79 приведены зависимости, полученные из опытов Для случая клина явно выраженного пика не было. Коэффициент теплоотдачи, очень малый в застойной зоне за ступенькой, возрастает к $l=2$ до величины 0,5 α_0 и потом снова плавню падает. Для большой модели получен явно выраженный пик

в районе $l=5$. Величина $\frac{\alpha}{\alpha_0}$ при этом возрастает до 3, что объясняется возможным переходом от ламинарного слоя к турбулентному.

Нэйсмит не приводит данных по стабильности работы датчиков из теллуристого серебра. Условия постановки опытов на двух моделях сделали результаты их малоприменимыми для сравнения. И все же из рассмотрения этих данных можно сделать вывод, что с помощью датчиков тепловых потоков Нэйсмиту удалось получить интересную картину теплообмена в застойной зоне и зоне повторного удара сверхзвукового потока о стенку. Шлиренфотографии, полученные Нэйсмитом, подтверждают границы застойной зоны в $l=2$ для клина и $l=5$ для конусцилиндра

52. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Датчики теплового потока позволяют получать местные значения направленного или полусферического излучения лучистой энергии. Наружная грань датчика при этом покрывается чернью с известной степенью черноты. Она воспринимает лучистую энергию, которая при этом превращается в тепловую энергию и перетекает к противоположной грани датчика теплопроводностью. «Холодная» грань датчика должна интенсивно охлаждаться, чтобы обратная радиация и конвекция были достаточно малыми

При исследовании свойств излучателя направленных тепловых потоков, описанного в разд 26, производился замер полей теплового потока в направлении, нормальном к плоскости амбразур излучателя. Для этого применялись платинно-констан-

тановые датчики, а при измерениях на оси излучателя — также компенсационный радиометр

Охлаждались датчики за счет принудительной конвекции воздуха. Датчик вместе с фарфоровой кассетой, в которой он был протарирован, фиксировался с помощью кронштейна-координатника в различных точках поля. Таким образом, были сняты

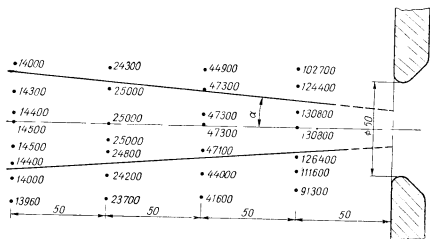


Рис 80 Поле тепловых потоков мощного излучателя

поля тепловых потоков при различных режимах. На рис. 80 представлены результаты измерения при температуре излучателя (по оптическому пирометру) 1490°C. Цифры у точек имеют размерность $вт/м^2$. Из рисунка видно, что внутри конуса с углом при вершине $2\alpha = \frac{\pi}{18}$ рад равномерность поля по каждому нормальному сечению высока (диаметр конуса, отсекаемого внешней плоскостью передней стенки, составляет 20 мм) [25]

53. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПРОПУСКАНИЯ ТЕПЛОПРОЗРАЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Коэффициент пропускания теплопрозрачных материалов легко определить с помощью датчиков теплового потока, как на специальном стенде, так и в производственных условиях. Интегральный коэффициент пропускания $\tau_{\text{ит}}$ характеризуется отношением показаний облучаемого датчика с фильтром из испытуемого материала и без него. Опытное определение коэффициента пропускания проводилось на пластинках из стекла, мусковита (белая слюда) и галита (каменная соль) Пластинки

располагались на пути к датчику лучистой энергии от излучателя, нагревательный элемент которого имел температуру около 1500°C. Для сравнения полученных данных с литературными мы воспользовались сведениями из работы И. А. Марголина и Н. П. Румянцева [64]. Эти сведения даны в виде зависимости $\tau_r = f(\lambda)$ (рис 81). На том же графике построено распределе-

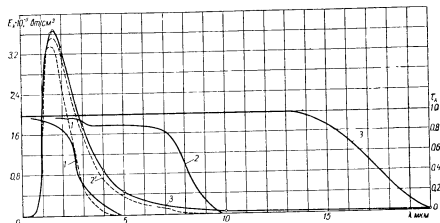


Рис 81 График зависимостей, полученных в результате определения теплопрозрачности некоторых материалов

1 — стекло 2 — мусковит 3 — газит

ние интенсивности излучения по длинам волн $E_\lambda = f(\lambda)$, согласно формуле Планка, в предположении, что источник является абсолютно черным телом при 1500°C. Для каждого из исследованных материалов было построено распределение $E'_\lambda = f(\lambda)$ после прохождения лучистым потоком фильтра простым умножением $E'_\lambda = \tau_r \cdot E_\lambda$. Расчетная величина $\tau_{\text{инт}}$ определялась отношением интегралов

$$\tau_{\text{инт}} = \frac{\int_0^{\infty} E_\lambda d\lambda}{\int_0^{\infty} E'_\lambda d\lambda}$$

представляющих площади, ограниченные линиями графиков E_λ и E'_λ по оси абсцисс. В расчете площади определялись планиметрированием. Ниже приведены результаты расчета и измерения $\tau_{\text{инт}}$:

Материал светодиода	Расчетное $\tau_{\text{инт}}$	Экспериментальное $\tau_{\text{инт}}$
Стекло	64,5	62,8
Мусковит	81,2	75,5
Газит	99,3	97,6

Из них видно, что значения $\tau_{\text{инт}}$, полученные экспериментально, несколько меньше расчетных. Это объясняется тем, что в опытах не учитывалось отражение лучистого потока от границ испытываемых пластинок. Для более точного определения количества энергии, поглощенной фильтром, необходимо проводить опыты с несколькими фильтрами одинакового материала. Это дает возможность оценить коэффициент отражения, так как первые опыты показали, что для приведенных материалов коэффициент интегрального пропускания сравнительно слабо зависит от толщины фильтра.

Возможность оперативной работы с датчиком позволит определить, например, теплопоглощение пленок различных синтетических материалов в процессе их изготовления — термической и механической обработки, а следовательно, и выбирать рациональный способ подвода тепла (конвекцией, радиацией) к пленке, решать вопросы мощности и расположения нагревателей и т. п.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выше были приведены лишь некоторые частные случаи применения приборов, предназначенных для измерения тепловых потоков.

Дальнейшее совершенствование приборов должно идти по пути повышения чувствительности элементов и улучшения регистрирующей аппаратуры. Необходимо полностью перекрыть диапазон измерений потоков от 10^{-3} до 10^8 вт/м² и существенно расширить диапазон температур, при которых проводятся измерения. Для современного физического эксперимента крайне необходимы приборы для измерения тепловых потоков при глубоких криогенных температурах вплоть до непосредственной окрестности абсолютного нуля.

В связи с расширением наших представлений о температуре как параметре, характеризующем не только насыщенность энергией, но и характер ее распределения между отдельными группами частиц, образовались понятия весьма глубоких отрицательных температур. В таких условиях терпит кризис понятие о разности температур и связанных с нею потоках энергии. Принципиальная теоретическая сторона этого вопроса и экспериментальное воплощение такого рода измерений представляет собой широкое поле деятельности как для теплофиликов теоретиков, так и для экспериментаторов.

Уже существующие описанные выше датчики тепловых потоков могут быть широко рекомендованы для контроля и автоматического управления различными технологическими процессами.

Энергия излучения при прочих постоянных факторах пропорциональна четвертой, а иногда даже более высокой степени температуры. В связи с этим малые отклонения в температуре приводят к не менее чем в четыре раза большим относительным отклонениям в потоках радиационной энергии. Это обстоятельство открывает весьма перспективную возможность измерения и контроля температуры посредством регистрации интегрального потока энергии излучения при помощи охлаждаемого датчика. Применение батарейных датчиков с большими значениями выходных сигналов делает возможным использование такой системы не только для контроля, но и для автоматического управления высокотемпературными технологическими процессами, например, в печах-кристаллизаторах для выращивания тугоплавких монокристаллов, отжигаемых печах и ряде других, технически важных случаев.

Очень эффективным, по-видимому, должно быть применение датчиков локальных тепловых потоков в микрокалориметрии при изучении энергетической кинетики различных химических и биологических процессов.

Во всех областях науки и техники местные измерители потоков энергии могут служить новым могучим средством анализа самых разнообразных явлений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адрианов В. Н., Радиометрический прибор для измерения лучистых потоков, сб. «Конвективный и лучистый теплообмен», М., Изд-во АН СССР, 1960.
2. Адрианов В. Н., Шорин С. Н., Теплообмен потока излучающих продуктов сгорания в канале, «Теплоэнергетика», 1957, № 3.
3. Аладьев И. Т., Экспериментальное определение локальных и средних коэффициентов теплоотдачи при турбулентном течении жидкости в трубах, «Изв. АН СССР, ОТН», 1951, № 11.
4. Амирханов Х. И., Исследование теплопроводности закиси меди, «Изв. АН АзССР», вып. 1, 1946, № 4.
5. Амирханов Х. И., Керимов А. М., Исследование теплоемкости воды и водяного пара вблизи пограничной кривой, «Теплоэнергетика», 1957, № 9.
6. Амирханов Х. И., Керимов А. М., Экспериментальное исследование теплоемкости воды и водяного пара при температурах от 50 до 400°C и давлениях от 1 до 1000 кг/см², «Теплоэнергетика», 1962, № 6.
7. Анфимов Н. А., Швецов А. П., Емкостный метод измерения нестационарных кратковременных тепловых потоков, «Изв. АН СССР, ОТН, Механика и машиностроение», 1960, № 4.
8. Барский Ю. П., Тепловой анализ, Тезисы докладов 2-го совещания по термографии, Казань, Изд-во Каз. филиала АН СССР, 1957.
9. Барский Ю. П., Количественная термография, Тезисы докладов 3-го совещания по термографии, Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1962.
10. Бахвалов Г. Р., Биркган Л. Н., Лабутин В. П., Справочник гальваностегия, М., Металлургиздат, 1954.
11. Бегункова А. Ф., Дульнев Г. Н., Платунов Е. С., Приборы для тепловых измерений, разработанные в ЛИТМО, Тепло- и массоперенос, т. 1, Минск, Изд-во АН БССР, 1962.
12. Берг Л. Г., Введение в термографию, М., Изд-во АН СССР, 1961.
13. Бернштейн Р. С., Померанцев В. В., Шагалова С. П., К вопросу о механизме сопротивления и теплоотдачи в трубных пучках, сб. «Вопросы аэродинамики и теплопередачи в котельно-топочных процессах», Госэнергоиздат, 1958.
14. Бонни, Прайс, Поведение материалов при сверхвысокой температуре, сб. «Получение и исследование высокотемпературной плазмы», М., ИЛ, 1962.
15. Боровиков С. И., Геращенко О. А., Федоров В. Г., Радиация пич, Збірник праць Інституту теплоенергетики № 24, К., Вид-во АН УРСР, 1962.
16. Браун, Чарльсон, Джонсон, Прибор для измерения стационарного потока тепла, «Приборы для научных исследований», 1961, № 8.

- 17 Векшинский С. А., Новый метод металлографического исследования сплавов, М.—Л., Гостехиздат, 1944
- 18 Герашенко О. А., Канд. дисс., К., 1954
- 19 Герашенко О. А., Удостоверение о регистрации № 5552 с приложением от 7.11.1957
- 20 Герашенко О. А., Ионов Н. Н., Исследование термо-э д с терпарар с гальваническими покрытиями, Конференция по автоматическому контролю и методам электрических измерений, Тезисы докладов, Изд-во ИВТИ, Новосибирск, 1963
- 21 Герашенко О. А., Федоров В. Г., Прибор для измерения локальных тепловых потоков, «Теплоэнергетика», 1958, № 6
- 22 Герашенко О. А., Федоров В. Г., Датчик теплового потока, Изд-во филиала ВНИИТИ, тема 34, № П-58-80/8, 1958
- 23 Герашенко О. А., Федоров В. Г., Прибор для измерения локальных значений мощных тепловых потоков, «Автоматика и приборостроение», Инф. листок А-28 (173), К., 1961
- 24 Герашенко О. А., Федоров В. Г., Абсолютные приборы для измерения лучистых потоков, Труды 2-го совещания по экспериментальной технике и методам высокотемпературных измерений (в печати)
- 25 Герашенко О. А., Федоров В. Г., Малонерционный излучатель мощных тепловых потоков, «Автоматика и приборостроение», 1962, № 2
- 26 Герашенко О. А., Федоров В. Г., Компенсационный радиометр, «Автоматика и приборостроение», 1962, № 2
- 27 Герашенко О. А., Федоров В. Г., Прибор для измерения лучистых потоков большой интенсивности, сб. «Приборы для измерения акустических и оптических величин», вып. 5, тема 36, № П-62-45/6, ГОСИНТИ, М., 1962
- 28 Герашенко О. А., Федоров В. Г., Использование датчиков теплового потока при высокотемпературных измерениях, Сессия Совета по высокотемпературной теплофизике, Сб. докладов, Изд-во АН УССР, К., 1963
- 29 Глишков М. А., Вавилов И. С., Приборы для исследования тепловой работы металлургических печей, «Заводская лаборатория», 1955, № 10
- 30 Глейзер П. Е. и др., Измерение коэффициента теплопроводности при температурах свыше 1000°C, «Приборы для научных исследований», 33, 1, 1962
- 31 Гончаренко С. К., Краткий справочник гальванотехника, К.—М., Mashiz, 1955
- 32 Гутарев В. В., Теплообмен в начальном участке прямой трубы при различных формах входа, Труды Московского ин-та химической машиностроения, т. XV, 1958
- 33 Гухман А. А., Илюхин Н. В., Основы учения о теплообмене при больших скоростях, М., Mashiz, 1951
- 34 Ермолин В. К., Интенсификация конвективного теплообмена в трубе в условиях закрученного потока, ИФЖ, 1966, № 11, автореферат диссертации, Л., 1961
- 35 Жукаускас А., Теплоотдача цилиндра в поперечном потоке воздуха, «Теплоэнергетика», 1955, № 4
- 36 Жуковский В. С., Киреев А. В., Шамшев Л. П., Оптический метод исследования распределения коэффициента теплоотдачи в вынужденном потоке, ЖТФ, 4, 10, 1934
- 37 Залкинд И. Я., Ананьев А. В., Корнер И. М., Малонерционный термометр ОРГРЭС, «Теплоэнергетика», 1960, № 7
- 38 Иванцов Г. П., Теплообмен между стянком и изтожницей М., Металлургиздат, 1951
- 39 Иоффе А. Ф., Полупроводниковые термоэлементы, М.—Л., Изд-во АН СССР, 1960
- 40 Калитин Н. Н., Новый тип актинометра для измерения напряжения солнечной радиации, «Метеорологический вестник», 1927, № 1
- 41 Калитин Н. Н., Актинометрия, М.—Л., Гидрометеоиздат, 1938
- 42 Камилов И. К., Исследование теплопроводности твердых тел в интервале 80—500°K, «Приборы и техника эксперимента», 1962, № 3
- 43 Капустянский Э. Ф., Барский Ю. П., Термографическая калориметрия, Труды 1-го совещания по термографии, М.—Л., Изд-во АН СССР, 1955
- 44 Катин Н. В., Металлизация расплавлением, Х., Дом техники, 1940
- 45 Кадельский Б. Д., Шатиль А. А., Исследование экспериментально горизонтальной циклонной камеры горения с воздушным охлаждением, «Теплоэнергетика», 1959, № 9
- 46 Кирпичев М. В., Исследование теплопередачи в отдельных местах цилиндрического тела в потоке воздуха, Труды Ленингр. физико-техн. лабораторий, вып. 2, 1925
- 47 Кокорев Д. К., Компенсационный радиометр, Труды Моск. ин-та хим. машиностроения, т. XV, 1958
- 48 Кондратьев Г. М., Тепловые измерения, М.—Л., Mashiz, 1957
- 49 Кочержков А. Н., Федоров В. Г., Система автоматического контроля горючих в лучевой золе крупных котлоагрегатов, «Энергетика и электротехническая промышленность», К., 1962, № 1
- 50 Кочо В. С., Исследование теплообмена в рабочем пространстве мартеновской печи, «Сталь», 1950, № 3
- 51 Кружилин Г. Н., Шваб В. А., Новый метод определения α -полю на поверхности тела, омываемого потоком жидкостей, ЖТФ, т. V, вып. 3 и 4, 1935
- 52 Кудрявцев Е. В., Чакалев К. Н., Шумаков Н. В., Неэвонарный теплообмен, М., Изд-во АН СССР, 1961
- 53 Кузнецов Л. А., Теплоотдача круглой струи, вытекающей в щель, «Энергомашиностроение», 1959, № 11
- 54 Курочкин Б. Н., Черногоров А. И., Температурный контроль работы сводов мартеновских печей, «Заводская лаборатория», 1953, № 6
- 55 Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Электромеханика сплошных сред М., Физматгиз, 1959
- 56 Лебедев Л. Д., Сушка инфракрасными лучами, М.—Л., Госэнергоиздат, 1955
- 57 Лельчук В. Л., Теплообмен и гидравлическое сопротивление при течиении с большими скоростями, ЖТФ, т. IX, 9, 1939
- 58 Лохте-Хольгрвен, Шаль, Веке, Получение и измерение высоких температур, сб. «Получение и исследование высокотемпературной плазмы», М., ИЛ, 1962
- 59 Лыков А. В., Теория теплопроводности, М., Госэнергоиздат, 1952
- 60 Мальцев В. В., Исследование движения газов и теплоотдачи во вращающихся роторах, «Вестник электротехнической промышленности», 1962, № 11
- 61 Махновецкий А. С., Метод ускоренной градуировки плоских измерителей тепловых потоков, «Изв. вузов. Приборостроение», № 1, 1959
- 62 Мишина В. Е., Субботин В. И., Ушаков П. А., Шолохов А. А., Об ошибке измерения температуры за счет искажений изотермы в районе заделки термометра, сб. «Ковнитивный и лучистый теплообмен» М., Изд-во АН СССР, 1960
- 63 Михеев М. А., Основы теплопередачи, М.—Л., Госэнергоиздат, 1956
- 64 Марголин И. А., Румянцев Н. П., Основы инфракрасной техники, М., Воениздат, 1957
- 65 Николаевский А., Душин П., Измерения малых тепловых потоков «Холодильная техника», 1959, № 2

66. Ожигов Г. Е., Малоионцированный термостабиль для исследований лучшего теплообмена Тепло- и массоперенос, т. 1, Минск, Изд-во АН БССР, 1962.
67. Перелешина А. П., О результатах экспериментального исследования т э д с в термисторах, ИФЖ, 4, 1960; Физико-химические свойства термисторов, изготовленных из окислов марганца, сб «Проблемы энергетика», М., Изд-во АН СССР, 1959
68. Петухов В. С., Опытное изучение процессов теплоперелачи, М.—Л., Госэнергоиздат, 1952.
69. Поварнин П. И., Кулаков И. Г., Нагрев электронной бомбардировкой, как новый метод изучения теплообмена при кипении жидкостей, Инф. письмо № 6, М., 1958
70. Поляков Ю. А., Применение плечочных датчиков для изучения теплообмена в диссоциированном потоке газа, сб. «Физическая газодинамика, теплообмен и термодинамика газов высоких температур», М., Изд-во АН СССР, 1962
71. Преображенский В. П., Теплотехнические измерения и приборы, М.—Л., Госэнергоиздат, 1953
72. Ривин О. В., Калориметрические определения на основе измерения тепловых потоков, Ученые записки Казахского университета, т XXXV, 1957.
73. Розенблат М. А., Магнитные усилители, М., Изд-во «Сов. радио», 1956.
74. Руссо В. Л., Исследование гарниссажных футеровок, «Изв вузов. Энергетика», 1962, № 1.
75. Савинов С. И., К теории пластинчатых актинометров типа Михельсона, Труды главной географической обсерватории, вып 14, Л., Гидрометеиздат, 1949.
76. Самарин А. М., Вакуумная металлургия, М., Металлургиздат, 1962
77. Селезнев К. П., Таранин А. И., Определение температурного поля в элементах газовых турбин методом электрического моделирования, «Энергомашиностроение», 1956, № 3.
78. Семикин И. Д., Костогризов В. С., Цыганков О. Л., Радиационный теломер, сб. «Автоматизация и приборостроение», вып II, К., ОГИЗ, 1948.
79. Сергиевская Т. Г., Теплоотдача статора электрической машины, «Вестник электропромышленности», 1962, № 11.
80. Синельников А. С., Чащихин А. С., Теплоотдача круглого цилиндра в зависимости от угла, атаки, ЖТФ, II, вып 8-9, 1932.
81. Стронг Д., Практика современной физической лаборатории, М.—Л., ОГИЗ, 1948.
82. Стирикович М. А., Сташкевич Е. В., К вопросу об экспериментальном исследовании теплообмена радиацией в топочной камере, ЖТФ, VI, вып 2, 1936.
83. Стюши Н. Г., О влиянии материала поверхности на теплообмен при пузырьковом кипении, сб «Вопросы теплообмена при изменении агрегатного состояния вещества», М.—Л., 1953.
84. Счастливы Г. Г., Авторское свидетельство № 147009 Бюлл изобретений, 1962, № 9.
85. Ткачев А. Г., Опытное исследование теплообмена при плавлении, сб «Вопросы теплообмена при изменении агрегатного состояния вещества», М.—Л., 1953.
86. Третьяков В. Д., Монометаллический актинограф, Труды Главной геофизической обсерватории, вып 5, Л., 1947
87. Федоров В. Г., Новый метод определения механического недожога, Энергетика и электротехническая промышленность, К., 1961, № 2
88. Федоров В. Г., Герашенко О. А., До питания по дослуженя теплообмену між стінкою і зернистим матеріалом, Збірник праць Інституту теплоенергетики, К., Вид-во АН УРСР, вип 16, 1959.
89. Федоров В. Г., Герашенко О. А., Авторское свидетельство по аявке № 793219/26 — 10 от 1.IX 1962 г., класс 601 к; 42 1, 19
90. Филлимонов С. С., Хрусталев Б. А., Адрианов В. Н., Измерение конвективной и лучистой составляющих сложного теплообмена методом двух радиометров, сб «Конвективный и лучистый теплообмен», М., Изд-во АН СССР, 1960.
91. Фильчаков П. Ф., О моделировании осесимметричных потенциальных полей на электропроводной бумаге, ДАН СССР, т. 125, 5, 1959
92. Фильчаков П. Ф., Панчицын В. И., Интеграторы ЭГДА, Моделирование потенциальных полей на электропроводной бумаге, К., Изд-во АН УССР, 1961
93. Хвольсон О. Д., Курс физики, т 4, Учение о магнитных и электрических явлениях, 1923; Том дополнительный, Физика 1914—1926 гг., М.—Л., Госиздат, т 2, 1926
94. Черноголов А. И., Приборы для измерения потоков тепла в высокотемпературных печах, «Заводская лаборатория», 1949, № 2
95. Чиркин В. С., Теплопроводность промышленных материалов, М., Машиз, 1962
96. Швец И. Т., Дыбан Е. П., Воздушное охлаждение роторов газовых турбин, К., Изд-во КГУ, 1959.
97. Шлихтинг Г., Теория пограничного слоя, М., ИЛ, 1956
98. Ягфаров М. Ш., Берг Л. Г., Принципы сравнительного термографического метода одновременного определения теплоемкости, теплопроводности, температуропроводности и тепловых эффектов, Труды 2-го совещания по термографии, Изд-во Казанского филиала АН СССР, 1961.
99. Якоб М., Вопросы теплопередачи, М., ИЛ, 1960
100. Beck I V., Hurwicz H, Trans ASME, ser C, v 82, 1960, No 1.
101. Blau N H, Proceedings of International Symposium on High Temperature Technology, 1960.
102. «Calom», Рекламный листок фирмы «Regula», Прага, 1962
103. Cook J. C., Levine H S, Rev Sci. Instr, v 31, 1960, No 10
104. Cermak I, «Automatiscac», 10, 1958, Praha.
105. De-Lauer, Ph. D Thesis, Calif Inst of Technology, Pasadena, 1953
106. Encyclopedia Britannica, v II, 1961
107. «Engineering», v 178, 1954, p. 47
108. «Engineering», v 181, 1956, p 397.
109. Fay I. A., Riddell F R, Journal of the Aeronautical Sciences, v. 25, 1958, No 2
110. Gardon R, Rev Sci Instr, v. 24, 1953, No. 5
111. Gardon R, Trans. ASME, ser C, v. 81, 1960, No. 4
112. Glaser P E, Rev Sci Instr, v. 28, 1958, No. 12
113. Hager N E, Rev. Sci. Instr., v. 31, 1960, No. 2.
114. Hooll I. H., Aeronautical Research Council Reports and Memoranda, London, 1957
115. Humble L V., Lowdermilk W H, Desmon L G, NACA Report, 1951, No 1020
116. Keller I A, Ryan N W, ARS Journal, Oct, 1961
117. Lawton R W, Prouty L R, Hardy J D, Rev Sci Instr, v 25, 1954, No 4
118. Martinelli R C, Morrin E H, Boelter L M K, NACA ARR, Dec, 1942
119. Masters I T, Stein S, Rev Sci Instr, v 27, 1956, No 12
120. Mattes B L, Perls T A, Rev Sci Instr, v 32, 1961, No. 3

121. Maulaid I, Rech aeronaut, 81, 37, 1961
 122 McAdams W, Heat Transmission, New York, London, 1942
 123 McGuire I M, Wraight H, Journal of Sci Instr, v 37, 1960, No 4
 124 A Method for Measuring the Thermal Conductivity, Rev Sci Instr, v 21, 1950, No 11
 125 Morgan A I, Carlson R A, Trans ASME, ser C, v 82, 1961, No 2
 126 Naismith A, International Heat Transfer Conference, London Rep 43, 1962
 127 Nunner W, VDI-Forschungsheft 455, Ausg 13, Bd 22, 1950
 128 Peris T A and oth, J Appl Phys 29, 1297, 1958
 129 Perry K P, Proc. Inst Mech Engrs, 1954, No 30, p 168
 130 Radiometer, Rev Sci Instr, v 24, No 5, 1953
 131 Rev Sci Instr, v 24, No 12, 1953
 132 Rev Sci Instr, v 27, p 116, 1956
 133 Rose P H, Stark W I, Journal of the Aeronautical Sci v 25, 1958, No 2
 134 Rompp H, Chemie Lexicon Stuttgart, 1962
 135 Seban R A, Trans ASME, ser C, v 28, 1960, No 2
 136 Sherwood T K, Trass O, Trans ASME, ser C, v, 82, 1960, No 4
 137 Stack B C, NACA TN 2686, apr 1952
 138 Thomas P H, Smith P G, J Sci Instr, v 37, 1960, No 3
 139 Willoughby A B, Rev Sci Instr, v 25, 1954, No 7

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр
Предисловие	3
<i>Глава I</i> Виды распространения тепловой энергии	5
1 Тепловое излучение	5
2 Теплопроводность	8
3 Конвекция	11
<i>Глава II</i> Исследование локального теплообмена	15
4 Конвекция и теплопроводность	15
5 Определение тепловых потоков по количеству пара	16
6 Водяные калориметры	19
7 Измерение местных тепловых потоков по расходу электроэнергии	21
8 Исследование локального теплообмена при плавлении	24
9 Методы аналогий	24
10 Оптический метод исследования теплообмена	26
11 Метод дополнительной стенки	27
12 Промежуточный электрод дифференциальной терморпары в качестве дополнительной стенки	34
13 Приборы для измерения тепловых потоков при неустановившихся или кратковременных режимах	39
14 Тепловое излучение Радиометр с вертушкой	41
15 Методы теплового расширения	43
16 Энтальпийный метод	44
17 Метод болометра	45
18 Метод термостолбика	46
19 Инерционный радиометр	49
20 Метод расплавления краски	50
21 Метод кондуктивного теплового потока	51
22 Пироэлектрический тепломер	53
23 Компенсационный метод	54
24 Универсальные тепломеры	58
<i>Глава III.</i> Приборы для создания контролируемых тепловых потоков и для их абсолютного измерения	60
25 Источники контролируемых мощных тепловых потоков	60
26 Малоинерционный излучатель Нагревательный элемент	64
27 Компенсационный радиометр	69
28 Инерционный радиометр для больших потоков	77

<i>Глава IV</i>	Датчики теплового потока	80
	29 Вопросы гомогенности Источники помех	80
	30 Способы изготовления датчиков	83
	31 Конструктивное оформление одиночных датчиков	88
	32 Термостатирование соединений во внешней цепи датчика	92
	33 Усиление и регистрация сигнала датчика	93
	34 Батарейные датчики теплового потока	95
	35 Методика градуировки датчиков	101
	36 Стенд для градуировки датчиков	102
	37 Градуировка на компенсационном радиометре	104
	38 Градуировка на водоохлаждаемой пластине	106
<i>Глава V</i>	Анализ погрешностей градуировки и измерения тепловых потоков с помощью датчиков	107
	39 Погрешности градуировки, характер градуировочной кривой	107
	40 Результаты градуировки партии платино-коп- стантановых датчиков	112
	41 Результаты градуировки партии медно-констан- тановых датчиков	115
	42 Батарейные датчики галетного типа	117
	43 Батарейные датчики спирального типа	118
	44 Искажение тепловой картины исследуемого те- ла, вносимое датчиком теплового потока Метод ЭТА	120
	45 Исследование возмущений, вносимых датчиком, численным методом	125
<i>Глава VI</i>	Применение датчиков теплового потока в тепло- техническом эксперименте	137
	46 Измерение локальных тепловых потоков в из- делях с $\lambda=0,2-2,0$ вт/м·град	137
	47 Прибор для определения теплофизических кон- стант	140
	48 Использование датчиков в термографической ка- лориметрии	144
	49 Прибор для измерения конвективных тепловых потоков до 10^5 вт/м ²	145
	50 Скоростной метод определения эффективности теплоизоляции	147
	51 Исследование Нэйсмита по определению тепло- вых потоков к стенке при сверхзвуковом обте- кании с отрывом	150
	52 Исследование поля тепловых потоков излучателя	152
	53 Определение коэффициента пропускания тепло- прозрачных материалов	153
	Заключение	155
	Литература	157