

СТРОИТЕЛЬНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

Г. А. КАСПАРЯН

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
 ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Из основных положений учения о теплообмене известно, что процесс теплопередачи, как и любой физический процесс протекает в пространстве и времени. Поэтому аналитическое исследование теплопроводности сводится к изучению пространственно-временного изменения основной физической величины—температуры, т. е. сводится к нахождению уравнения

$$t = f(x, y, z, \tau). \quad (1)$$

Это уравнение является математическим выражением нестационарного температурного поля.

Уравнение стационарного температурного поля

$$t = \varphi(x, y, z); \quad \frac{\partial t}{\partial \tau} = 0 \quad (2)$$

показывает, что температура в любой точке температурного поля не зависит от времени, а является функцией координат.

Тепловой поток, проходящий в этом случае через испытуемый образец, будет постоянным как по величине, так и по направлению.

Дифференциальное уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t \quad (3)$$

описывает явление теплопроводности в самом общем виде, устанавливает зависимость между температурой, временем и координатами, а также совместно с условиями однозначности дает конкретное решение основной задачи, связанной с нахождением температурного поля тела.

В настоящее время имеется множество методов и приборов для определения теплофизических характеристик различных строительных материалов. Это объясняется тем кругом практических требований, которые предъявляются к материалам, используемым при различных режимах, широком интервале изменения температур, влажности, механического состава и плотности.

Часто практика предъявляет ряд весьма серьезных требований в смысле минимальной длительности процесса при определении искомых характеристик  $\lambda$ ;  $a$ ;  $c$ , в смысле сведения к минимуму всевозможных структурных и термических нарушений материала, а также одновременного определения всех трех термических характеристик на одной экспериментальной установке. Несмотря на все многообразие методов, по определению теплофизических характеристик материалов, последние по состоянию температурного поля в процессе эксперимента могут быть разделены на методы стационарного режима и методы нестационарного режима.

### Методы стационарного режима

В основу этих методов и приборов, подробному описанию которых посвящена обширная литература [5, 6, 7, 8, 9] заложено условие создания стационарного по величине и направлению теплового потока через испытуемый образец, а также постоянство температурного поля, характеризующегося уравнением (2).

В зависимости от геометрической формы испытуемого образца, указанные методы можно разделить на следующие группы: 1) метод пластины; 2) метод шара; 3) метод трубы. В свою очередь метод пластины подразделяется на метод одной пластины, метод 2-х пластин и сравнительный метод.

Схема прибора (рис. 1) работающего по методу одной пластины, состоит из основного нагревателя (1), бокового (2) и нижнего (2) компенсационных нагревателей, холодильника (3).

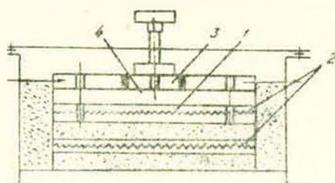


Рис. 1.

Свободное пространство между прибором и кожухом, а также между верхними и нижним нагревателями засыпано термоизоляционным материалом, (расплющенный асбест, минеральная вата, вермикулит) предварительно хорошо просушенный. Плоский (цилиндрической формы) испытуемый образец (4) одной стороной соприкасается с основным нагревателем, другой — с холодильником с проточной водой.

Тепло от основного нагревателя (1) проходит через образец и поглощается холодильником. Назначение бокового (2) и нижнего (2) нагревателей — компенсировать утечку тепла с боков и снизу. Необходимая точность эксперимента будет достигнута при установившемся тепловом потоке, что достигается путем длительного нагрева и соответствующей регулировки силы тока в электронагревателях. При создавшемся стационарном режиме все тепло, выделяемое основным нагревателем ( $\dot{q}$ ) должно пройти через испытуемый образец (4), причем тепловой поток при этом будет направлен по нормали к испытуемому образцу. Коэффициент теплопроводности вычисляется по формуле:

$$\lambda = \frac{Q \cdot \delta}{F (t_1 - t_2)} \quad (4)$$

В приборе, основанном на методе 2-х пластин, отсутствует нижний компенсационный нагреватель и два совершенно одинаковых, как по составу, так и размерам, образца устанавливаются сверху и снизу основного нагревателя, соприкасаясь своими вторыми поверхностями соответственно с верхним и нижним холодильниками, установленными в приборе. Характерным преимуществом является более полный учет количества тепла по сравнению с методом одной пластины. В приборах, работающих по сравнительному методу отсутствуют охранные (компенсационные) приспособления, и тепловой поток в этом случае проходит через исследуемый образец и эталон с известным коэффициентом теплопроводности. Измерив разности температуры в образце и эталоне в фиксированных точках, можно определить коэффициент теплопроводности  $\lambda_x$  исследуемого образца, не измеряя расхода тепла, так как тепловой поток, проходящий через все пластины, считается постоянным ( $q = \text{const}$ ), а тепловое сопротивление медных пластин принимается равным нулю.

Применение сравнительных методов не разрешает трудностей устройства охранных приспособлений, так как боковые утечки тепла могут настолько исказить температурное поле, что оно становится не одномерным и основные расчетные соотношения выведенные в предположении одномерного температурного поля, становятся неверными. К преимуществу можно отнести простоту конструкции прибора, к недостаткам—неизбежность боковых утечек тепла, наличие большого числа контактных поверхностей, вызывающих вредное влияние воздушных прослоек.

Для определения теплопроводности порошкообразных, сыпучих и некоторых волокнистых материалов, служит метод шара в одноименный прибор. Шаровой прибор в основном состоит из 2-х concentрично расположенных по отношению друг к другу разъемных, полых, металлических шаров. В шаре меньшего диаметра помещается электронагреватель. Пространство между шарами заполняется испытуемым материалом. Коэффициент теплопроводности материала определяется по формуле, для шаровой стенки:

$$\lambda = \frac{Q \left( \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right)}{4Y\pi (t_1 - t_2)} \quad (5)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  — температуры поверхностей шаров, измеряемые термометрами;

$R_2$  и  $R_1$  — соответственно радиусы наружного и внутреннего шаров.

Положительная особенность данного метода заключается в том, что одномерность стационарного температурного поля создается без наличия охранных нагревателей, и объясняется тем, что внутренний шар, с размещенным внутри нагревателем, всей своей поверхностью

соприкасается только с испытуемым материалом. Холодильником в данном приборе является или термостат, или окружающий атмосферный воздух. Недостатками метода являются—длительность эксперимента (иногда доходит до суток), трудность центровки шаров во время их сборки, а также точность эксперимента в большей степени зависит от равномерного заполнения материала пространства между шарами.

Не менее важное значение, в практическом отношении, имеет метод трубы для испытания на теплопроводность теплоизоляционного материала трубопроводов, по которым протекает теплоноситель или хладагент—например, вода, перегретый пар, холодильный агент (рассол) и т. д.

На внешнюю поверхность наружной металлической трубы накладывается испытуемый материал, внутренняя же труба (малого диаметра) из кварца, наматывается электрической спиралью. По наступлении стационарного режима, с помощью термометров, расположенных на поверхности трубы и изоляции определяется перепад температур. Коэффициент теплопроводности определяется по формуле, написанной для цилиндрической стенки. Часто во избежание торцевых потерь тепла, торцы трубы изолируют или устанавливают охранные нагреватели с самостоятельной регулировкой. К недостаткам метода можно отнести: длительность эксперимента и трудность поддержания постоянной температуры на поверхности испытуемого образца.

В настоящее время создано множество пластинчатых, трубчатых и шаровых приборов. Характер этих приборов определяется: 1) способом учета количества тепла; 2) способом измерения температуры поверхности образца; 3) способом устранения вредных влияний боковых утечек тепла или рационального учета их; 4) способом определения величины теплопроводности абсолютным путем или относительно другого материала (эталоны) с известной теплопроводностью. Способы учета величины  $Q$  (количества тепла) для приборов, основанных на принципе стационарного режима, различны. Чаще всего измеряется мощность расходуемой электрической энергии основным нагревателем. Имеются приборы, в которых тепловой поток вычисляется путем определения изменения теплосодержания вещества, находящегося в тепловом контакте с исследуемым образцом или путем применения тепломеров.

В других приборах величина теплового потока определяется по скрытой теплоте плавления, конденсации или парообразования определенных веществ, находящихся в тепловом взаимодействии с поверхностью исследуемого образца материала,

Основным направлением в области развития стационарных методов является: автоматизация управления приборами [10, 11], расширение температурных пределов с применением приборов в области низких [11, 12] и высоких [13, 14] температур, определение коэффициентов теплопроводности под давлением, при насыщении различными газами и в вакууме.

Общими недостатками стационарных методов являются: большая длительность эксперимента, что не дает возможность вести исследование с влажными материалами, сложность аппаратуры, принципиальная невозможность определения коэффициента температуропроводности, который должен вычисляться по теплоемкости тела. Следовательно, для вычисления коэффициента температуропроводности необходимо определение удельной теплоемкости, что представляет для теплоизоляционных материалов проблему, не менее сложную, чем определение коэффициента теплопроводности. Указанные недостатки заставляют переходить на новые методы определения термических коэффициентов, основанных на закономерностях нестационарного температурного поля.

### Методы нестационарного режима

Нестационарное тепловое состояние характеризуется тем, что температура в любой точке тела изменяется в пространстве и времени, т. е. температура является функцией пространства и времени.

Основным уравнением методов нестационарного режима является известное дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) = a \nabla^2 t \quad (3)$$

где  $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  — оператор Лапласа.

Это дифференциальное уравнение, как уже было отмечено, совместно с краевыми условиями устанавливает связь между температурой в определенной точке, временем и коэффициентом температуропроводности.

Характерной особенностью нестационарного теплового состояния является то, что тепловой процесс всегда связан с изменением теплосодержания тела и им обуславливается. Так как скорость изменения теплосодержания прямо пропорциональна способности материала проводить тепло (т. е. коэффициенту теплопроводности  $\lambda$ ) и обратно пропорциональна его аккумулирующей способности (т. е. объемной теплоемкости  $C$ ), то в целом скорость теплового процесса определяется значением коэффициента температуропроводности  $a$ .

При наличии источников тепла внутри тела нестационарное тепловое состояние удовлетворяет дифференциальному уравнению вида

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{w}{c_j \rho} \quad (6)$$

где  $w$  — удельная мощность источников тепла ( $\text{ккал/м}^3 \text{ час}$ ).

Если  $w = 0$ , то уравнение (6) принимает вид уравнения (3).

Нестационарные методы ближе всего отражают переменный во времени термический режим работы материалов в реальных условиях

и требуют короткого времени для определения термических характеристик.

В силу точности, простоты, кратковременности нестационарных методов, а также ввиду того, что структурные нарушения (за малым исключением) материала и нарушения в режиме его влажности и температуры наименее вероятны в процессе эксперимента по определению теплофизических коэффициентов, они в последнее время получили чрезвычайно большое распространение. Кроме того, характер опыта по определению  $\lambda$  и  $a$  крайне несложен, требует минимального оборудования и легко воспроизводим.

Ввиду очевидных и многочисленных преимуществ, нестационарные методы разработаны в большом числе вариантов.

В технической литературе указаны возможности использования нестационарных методов для комплексного определения теплофизических характеристик [15, 16, 17, 18]. Сообщения, имеющиеся в периодической иностранной литературе последних лет, также указывают несомненный поворот к нестационарным методам [19, 20].

Методы регулярного режима, основоположниками которых являются Буссинеск и Кондратьев [4] основаны на экспоненциальной зависимости изменения температуры материала от времени в условиях регулярного режима:

$$U - t = \theta = A U e^{-m\tau}. \quad (7)$$

Один из основных законов регулярного режима заключается в том, что логарифм разности между температурой любой точки тела и температурой окружающей среды изменяется с течением времени по линейному закону, причем скорость изменения логарифма разности температур одинакова для всех точек тела. Величина „ $m$ “, названная Кондратьевым темпом охлаждения, характеризует скорость охлаждения тела, зависит только от геометрических размеров, термических коэффициентов материалов этого тела и граничных условий. Она может быть определена из прямолинейной части графика  $\ln \theta =$

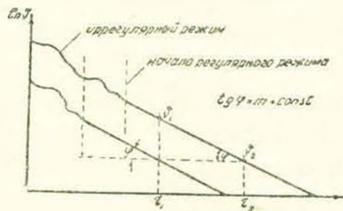


Рис. 2.

$= f(\tau)$  (рис. 2), построенного в полулогарифмических координатах, отвечающей наступлению регулярного режима.

По оси ординат откладывается логарифмическая шкала разности  $u - t = \theta$ , по оси абсцисс (равномерная шкала) — время  $\tau$ .

Начальные участки полулогарифмических графиков имеют неправильную форму, характерную для иррегулярного режима. По истечении некоторого времени наступает регулярный режим, и графики принимают форму прямых линий, тангенс угла наклона которых к оси времени равен  $-m$ . В силу одинаковости  $m$  для всех точек тела эти прямые,

изображающие поле температур в регулярном режиме, параллельны между собой.

Между величиной  $m$  и коэффициентом температуропроводности  $a$  существует определенная зависимость, которую Кондратьев устанавливает при 2-х случаях граничных условий, служащих основой для предлагаемых им методов определения величины  $a$  и  $\lambda$  при бесконечном и конечном значении коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ . При  $\alpha = \infty$  значение  $m$  становится прямо пропорциональным коэффициенту температуропроводности.

$$a = K \cdot m_{\infty} \frac{M^2}{\text{час}}, \quad (8)$$

где  $K$  — фактор формы, который зависит от формы и размеров тела (Кондратьевым вычислен коэффициент „ $K$ “ для простых геометрических тел: шара, цилиндра, параллелепипеда). Для тел неправильной формы „ $K$ “ определяется по методу калибровки, т. е. путем сравнения с эталонным образцом. Этот метод определения коэффициента температуропроводности был назван Кондратьевым методом акалориметра. Для ведения эксперимента образец, нагретый выше температуры охлаждающей среды, и известным коэффициентом формы охлаждается в среде при условии  $t_{\text{ср}} = \text{const}$  и  $\alpha = \infty$ . Затем из наблюдений за изменением температуры строят график  $\ln \theta = f(\tau)$  и определяют темп охлаждения  $m_{\infty}$ , а следовательно и коэффициент температуропроводности  $a$ . Если же охлаждение испытуемого образца проходит при условии  $t_{\text{ср}} = \text{const}$  и конечном  $\alpha \neq \infty = \text{const}$ , то „ $m$ “ определяется по формуле:

$$m = \frac{\alpha}{R_v} K_n, \quad (9)$$

где  $K_n$  — критерий Кондратьева — характеризует неравномерность температурного поля и интенсивность взаимодействия поверхности тела с окружающей средой.

$R_v$  — обобщенный размер тела, равный отношению объема тела к его поверхности.

Зная  $a$  и коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  по величине „ $m$ “ можно определить коэффициент теплопроводности.

Второй метод регулярного режима, названный Кондратьевым ламбдакалориметром, предназначен для определения коэффициента теплопроводности материала. Этот метод не представляет особого интереса, так как для его осуществления при ведении эксперимента требуется ряд условий и предположений; так, например, для определения коэффициента теплопроводности материала  $\lambda$  при помощи ламбдакалориметра необходимо предварительно определить величину  $a$  для этого материала методом регулярного режима при помощи акалори-

метра, предполагая, что этот коэффициент численно равен коэффициенту температуропроводности, определенному по методу ламбдакалориметра, или при исследовании этим методом коэффициенты теплоотдачи для образца и эталона принимаются равными и т. д.

С целью устранения этих недостатков Кондратьевым был предложен третий вариант регулярного режима, названный им методом 2-х точек. Сущность этого метода заключается в том, что при охлаждении испытуемого образца, в стадии регулярного режима ( $\alpha = \text{const}$  и  $t_{\text{ср}} = \text{const}$ ) в один и тот же момент времени отношение избыточных температур в 2-х разных точках образца — есть величина постоянная, не зависящая от времени и имеющая зависимость от координат точек, формы и размеров тела, а также критерия Био.

В четвертом методе регулярного режима, названный Кондратьевым методом бикалориметра или методом составного тела, рассматривается регулярный режим охлаждения некоторой составной системы (шар в шаре).

Прибор состоит из двух concentрично расположенных полых металлических шаров. Для получения значения коэффициента теплопроводности испытуемого материала опыт ставится дважды, один раз для определения коэффициента температуропроводности материала  $\lambda$ , другой раз — для получения объемной теплоемкости  $c$  материала. В первом случае внутренний шар не заполняется ртутью и бикалориметр охлаждается, при условии  $\alpha = \infty$ , только с испытуемым материалом, расположенным в пространстве между двумя шарами. При заполнении ртутью, внутреннего шара, вновь проводят охлаждение предварительно нагретого бикалориметра, при первоначальных условиях ( $\alpha = \infty$ ). Зная термические коэффициенты ртуть, можно определить объемную теплоемкость  $c_{\text{r}}$  материала по величине  $m$ , соответствующей охлаждению системы ртуть—материал. Коэффициент теплопроводности определяется по формуле  $\lambda = a \cdot c \cdot \gamma$ .

Преимуществом метода является отсутствие необходимости определения коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ . Неудобство метода заключается в том, что в 2-х опытах, как при определении  $\lambda$ , так и при определении  $c_{\text{r}}$ , необходимо обеспечить совершенно одинаковую плотность набивки материала.

Идея составного тела была в дальнейшем развита учеными Бегунковой, Чудиновским, Симоновым, Казанским и др., в результате чего возникли цилиндрические и пластинчатые (плоские) бикалориметры.

Основным достоинством методов регулярного режима является независимость расчетных формул от координаты (за исключением метода 2-х точек) измеряемых точек материала или эталона. Однако эти методы имеют существенные недостатки: невозможность определения из одного опыта всех термических коэффициентов испытуемого материала, проведение эксперимента связано с большими трудностями из-за осуществления граничных условий, так, например, Казанским

во время своих экспериментов, обнаружил, что при невыполнении условия  $t_{cp} = \text{const}$ , темп охлаждения „ $m$ “, а следовательно, и теплофизические коэффициенты имеют значительные колебания. Опыты показывают, что при изменении температуры воды в термостате на  $0,05^\circ\text{C}$  наименьшая ошибка составляет  $5 \div 6\%$ ; трудность состоит в правильном построении графиков, выражающих зависимость  $\ln \theta = f(\tau)$  (опыты Левина, Малковой, Семеновской и Шурыгиной), из-за частых изломов, что практически затрудняет точное определение времени наступления регулярного режима, а, следовательно снижает точность определения термических коэффициентов; не во всех местах соблюдается условие  $\alpha = \infty$  или  $\alpha \rightarrow \infty$ , существенное отклонение от этого условия могут возникнуть в местах ввода термопар, выступающих из ванны; определение в ряде случаев коэффициента теплообмена  $\alpha$  вносит дополнительные затруднения в эксперимент; обязательный ввод измерителя температуры внутрь испытуемого образца нарушает структуру материала (особенно у плохих проводников тепла) с искажением температурного поля образца. Эти методы мало пригодны для испытания влажных материалов, так как в процессе эксперимента изменяется градиент температуры, а следовательно имеет место перераспределение влаги в материале.

Сравнительный метод нагревания с постоянной скоростью, предложенный проф. А. В. Лыковым основан на решении задачи нагревания тела в воздушной среде с постоянной скоростью. Анализируя подобные решения, можно прийти к выводу, что с определенного значения критерия Фурье ( $F_0 = 0,5$ ) температура любой точки тела становится линейной функцией времени.

Метод нашел свое развитие при исследовании влажных изоляционных порошкообразных материалов и может быть распространен на тела любой формы. Обращаясь к исследованию температурного поля пластины толщиной  $2R$ , которая находится в среде с температурой  $t_c$ , изменяющейся по линейному закону с течением времени, а теплообмен ее поверхностей со средой происходит по закону конвекции, то по перепаду температуры между поверхностью тела  $t_n(R; \tau)$  и любой его точкой  $t(\xi; \tau)$  можно определить коэффициент температуропроводности по формуле:

$$a = \frac{b(R^2 - \xi^2)}{n [t_n - t(\xi; \tau)]} \text{ м}^2/\text{час}, \quad (10)$$

где  $b$  — скорость нагревания среды,  $^\circ\text{C}/\text{час}$ ;

$n$  — постоянное число, равное для неограниченной пластины 3, для шара 6, для неограниченного цилиндра 4. А по перепаду температур между окружающей средой  $t_c(\tau)$  и поверхностью тела  $t_n(R, \tau)$  можно определить объемную теплоемкость по формуле:

$$c\gamma = \frac{a(t_c - t_n)n}{2bR} \quad (11)$$

При этом возникает необходимость предварительного определения коэффициента теплообмена по нагреванию эталона в тех же условиях.

Шурыгина, приняв за основу метод Лыкова, устранила его основной недостаток, заключающийся в сложности аппаратуры при нагревании в воздушной среде с постоянной скоростью, и с целью устранения определения коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ , разработала и практически осуществила сравнительный метод нагревания с постоянной скоростью. При этом нагревание испытуемого образца, соприкасающегося с эталоном производится в жидкой среде, с интенсивным перемешиванием, что обеспечивает условие  $\alpha \rightarrow \infty$ . Для проведения эксперимента берутся два испытуемых образца одинаковой толщины в форме дисков и зажимаются между эталонными дисками с известными термическими коэффициентами. После чего вся эта система скрепляется посредством зажимов и помещается в сосуд с водой, которая при интенсивном перемешивании нагревается с постоянной скоростью. Температура измеряется между испытуемым образцом и эталоном, между испытуемыми образцами и в окружающей среде. Если же холодный спай термомпары поместить в окружающую жидкую среду, то температуру достаточно измерить только в двух точках. Шурыгина аналитическим путем получила расчетные формулы, для определения коэффициента теплопроводности, в случае пластины, шара и неограниченного цилиндра. Преимуществом метода является простота экспериментальной установки и возможность определения из одного опыта всех термических коэффициентов.

Основные недостатки заключаются в трудности регулировки скорости нагрева и значительной трудности создания теплоизоляции испытуемого образца.

В методе неограниченного эталона, разработанном Красовской, лежит решение задачи охлаждения по закону теплопроводности неограниченной пластины в неограниченной среде, принимаемой за эталон. Метод был предложен для сыпучих порошкообразных материалов (мука, пшеница, сахар, какао и т. д.) когда вводить датчик температуры в исследуемый материал невозможно из-за сильного искажения температурного поля. Прибор представляет собой бетонный калориметр, размеры которого позволяют считать его неограниченной средой (эталон). Внутри калориметра имеется прямоугольная щель, в которую во время испытаний засыпают подогретый порошкообразный материал. Измерители температур устанавливаются в эталоне. Испытания по этому методу показывают, что температура в эталоне вначале увеличивается, достигает максимума, а потом начинает уменьшаться. Зная время ( $\tau_{\max}$ ), для достижения максимальной температуры и величину последней ( $t_{\max}$ ), можно определить коэффициент теплопроводности и коэффициент температуропроводности из одного опыта.

Влиянием термовлагопроводности пренебрегается ввиду низкого

перепада температур ( $5 \div 10^\circ\text{C}$ ) между температурой материала и калориметром. Достоинством метода является кратковременность (20–30 мин.), простота устройства прибора и техника проведения эксперимента. Недостатком является нестрогое выполнение граничных условий, в силу продолжительности засыпки испытуемого материала в щель калориметра, и следовательно, наличия потери тепла и неравномерности распределения температуры как по толщине образца, так и по плоскости соприкосновения материала и эталона. К недостаткам можно отнести также то, что калориметр изготовлен из бетона, который обладает значительным водопоглощающим свойством, следовательно неустойчивыми теплофизическими характеристиками. В дальнейшем, метод неограниченного эталона был развит Шевельковым (охлаждение цилиндра в неограниченной среде) с целью комплексного определения теплофизических коэффициентов изоляционных материалов в зависимости от температуры [24].

Измеряя температуру неограниченной среды в нескольких точках, расположенных на различных расстояниях от образца, Шевельков получил возможность установить влияние температуры на термические свойства материала.

Абсолютный метод мгновенного источника тепла Чудиновского и Богомолва разработан для определения термических коэффициентов дисперсных тел (почвогрунтов) в их естественном состоянии, а также в лабораторных условиях. При этом почву они принимают за неограниченную среду, вводя в нее предварительно нагретую (на  $30 \div 40^\circ\text{C}$  выше температуры почвы) лагунную тонкостенную пластину и принимая ее теплоотдачу как действие мгновенного плоского источника тепла. Изменение температуры почвы, на расстоянии 25 мм от пластины—зонда, измеряется термпарой, а количество отданного пластиной тепла подсчитывается по массе, теплоемкости и температуре пластины измеренной перед началом и в конце опыта.

Во время эксперимента наблюдается как температура в любой точке среды вначале увеличивается, достигая некоторого максимума, а потом уменьшается. Преимуществами метода является кратковременность опыта и возможность определения из одного опыта всех термических коэффициентов. Основным недостатком метода можно считать невыполнение начального условия из-за некоторого запаздывания действия источника тепла по сравнению со временем эксперимента. Метод мгновенного источника тепла получил дальнейшее развитие в работах [21, 22, 23] М. В. Кулакова, где он разработал и осуществил новый сравнительный метод определения термических характеристик твердых теплоизоляторов в лабораторных условиях. В основе этого метода лежит решение задачи охлаждения неограниченного тела в неограниченной среде (эталоне) при наличии плоского мгновенного источника тепла в середине образца. Главной частью экспериментальной установки является «калориметр», который в применении к задаче для двух тел представляет собою два гипсовых паралле-

пипеда, между которыми зажимаются два одинаковых по составу и размерам испытуемых образца. Пластинчатый электрический нагреватель расположен между испытуемыми образцами. „Калориметр“ применительно к задаче для трех тел имеет три параллелепипеда, между которыми также зажимаются два одинаковых испытуемых образца с той лишь разницей, что пластинчатый электрический нагреватель в этом случае заделан симметрично в одном из параллелепипедов (эталонов). С помощью реле времени, соединенного с электрическим секундомером можно точно установить время действия источника тепла, которое колеблется обычно в пределах от 0,5 до 2,5 сек. Продолжительность опыта от 5 до 20 мин. Метод позволяет вести испытания в вакууме, под давлением, при высоких и низких температурах, а также при наличии влаги внутри исследуемых материалов, что является большим преимуществом этого метода. Строительные материалы в большинстве случаев гигроскопичны и поглощают из окружающего воздуха определенное количество влаги. В связи с этим исследуемые строительные материалы в той или иной степени обладают влажностью. Передача тепла в этом случае осложняется перемещением влаги. Под действием градиента влажности происходит перемещение влаги внутри влажного материала от мест с большей влажностью к местам с меньшей влажностью. Это явление носит название влажпроводности и характеризуется не только молекулярным перемещением влаги (диффузия пара и осмотически связанной жидкости), но и молярным перемещением жидкости (капиллярная влага).

Но интенсивное перемещение влаги в направлении потока тепла имеет место и при наличии градиента температуры. Это явление называется термовлажпроводностью. В некоторых случаях величина термовлажпроводности может быть отрицательной, так, например, в пористых маловлажных материалах из-за большего молекулярного веса воздух перемещается в сторону потока, а водяной пар, имеющий меньший молекулярный вес—против (относительная термодиффузия). В обычных же условиях эксперимента влага движется по направлению потока тепла. Процесс теплообмена во влажных материалах неразрывно связан с процессом влагообмена. Обычное нахождение температурного поля влажного материала связано с решением системы дифференциальных уравнений, которые для простейших случаев показывают, что изменения поля влажности в материале не совпадают с изменениями поля температур, вызванные каким-либо возмущением. Поэтому, если ограничиться малыми промежутками времени, точнее—малыми значениями критерия Фурье  $\left( F_0 = \frac{a \tau}{R^2} \right)$ , то величина изменения влажности во времени мало отличается от нуля, тогда дифференциальное уравнение теплопроводности для влажного материала становится тождественным дифференциальному уравнению теплопроводности для сухих материалов. Поэтому для исследований, проводимых при положительных температурах с влажными материа-

лами, необходимо применять такие методы, которые основаны, на кратковременном тепловом воздействии на влажный материал. С этой точки зрения методы неограниченного эталона и мгновенного источника тепла имеют определенное преимущество перед методами регулярного режима, поскольку последние основаны на свойствах нестационарного температурного поля в стадии регулярного режима, который наступает через определенное, иногда значительное время.

Рассматривая метод Кулакова с мгновенным источником тепла и учитывая то обстоятельство, что температурная волна претерпевает изменение (затухание) из-за числа контактных поверхностей (отрицательное влияние воздушных зазоров между нагревателем и образцом и между поверхностью соприкосновения образца и эталона) и принимая во внимание действие источника тепла после его отключения и, следовательно, невозможность правильного ведения учета действия мгновенного источника тепла (так как электрические приборы показывают расход электроэнергии при включенном нагревателе), можно прийти к заключению об отсутствии учета данным методом ряда погрешностей, что, в действительности, приводит к некоторому искажению данных поставленного эксперимента.

Исключение ввода термопары в исследуемый материал при исследовании термических характеристик, является положительным фактором для получения достоверных данных, но введение термопары в эталонный материал, взамен испытуемого образца, не исключает допущения ошибок, так как это обстоятельство также связано с нарушением структуры материала (эталона) и искажением температурного поля последнего; а так как мы, во время опыта ориентируемся на данные, полученные дифференциальными термопарами, введенными в эталон, то существенные погрешности и в этом случае также неизбежны.

Дальнейшее развитие и улучшение сравнительного метода мгновенного источника тепла было предложено К. Р. Кантером. Предложение Кантера сводится к сокращению расстояния от нагревателя до горячего спая дифференциальной термопары до толщины образца  $\delta$ , т. е. спай термопары устанавливается между образцом и эталоном.

Разумеется скорость распространения температурной волны достигнет горячего спая термопары быстрее, чем в методе Кулакова. При исследовании Кантером тепловых свойств древесины предлагаемым методом были выявлены следующие его преимущества.

1) Температурный максимум получался не растянутым, как в методе Кулакова, а резким, в силу чего значения  $\alpha$  и  $\lambda$  вычислялись более точно и по упрощенным формулам.

2) Продолжительность опыта значительно сокращается и доходит до 2-10 минут. В предлагаемом методе определение термических характеристик эталона производится на этой же установке, тогда как в методе Кулакова  $\lambda$  и  $C$  эталонных калориметров определялись стационарным методом.

Необходимо отметить также, что расположение измерителя температуры на границе эталона с испытуемым образцом является наилучшим, чем в любой другой точке, по оси системы внутри эталона: так как с углублением измерителя температуры точность определения термических характеристик снижается, а длительность опыта возрастает.

Определенную точность в расчетные формулы с учетом поправок на конечное время, действия источника тепла внес Каганов. Сравнительный метод мгновенного источника тепла, предложенный Кулаковым, и предложение Кантера по усовершенствованию данного метода основаны на мгновенном выделении тепла нагревателем, при этом не ведется учет погрешностей, получаемых в результате конечного действия источника тепла. Кулаков и Кантер, без основания с целью уменьшения погрешностей, связанных с конечным действием нагревателя, доводят время действия до  $1 \div 2$  сек, что вносит определенные экспериментальные трудности при определении количества выделенного в нагревателе тепла, ведет само по себе к увеличению погрешностей. Каганов предлагает при той же экспериментальной установке, расчетные формулы строить не на основе действия мгновенного источника тепла, а исходя из фактического действия источника тепла (исключая импульсный нагрев образцов), что позволит получить более строгие данные по исследованию термических коэффициентов материалов. На основе всего сказанного, можно сделать следующие общие выводы:

1) Стационарные методы имеют существенные недостатки, к которым можно отнести большую длительность эксперимента, возможность определения из одного опыта только коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , сложность аппаратуры и техники ведения исследования. Усовершенствование экспериментальных установок и автоматизация управления приборами далеко не устраняют их основных недостатков.

2. Методы, основанные на уравнениях нестационарного температурного поля, получили достаточно строгое теоретическое обоснование. Эти методы, в основном, являются скоростными и дают возможность комплексно определять все теплофизические характеристики на одном приборе и из одного опыта.

Становится принципиально возможным вести исследования под давлением и в вакууме, а также при высоких и низких температурах. При незначительной продолжительности опыта ( $5 \div 10$  мин.) и малых температурных перепадах внутри исследуемого материала, эти методы могут быть применены также к влажным материалам.

3) Методы регулярного режима имеют специфические недостатки, связанные с конструктивным оформлением приборов (шар, цилиндр), ограничивающим их применение для целого ряда теплоизоляционных материалов. Невозможность определения из одного опыта всех термических характеристик и трудность осуществления на прак-

тике граничных условий все еще остаются основными недостатками методов регулярного режима.

4) Развитие методов исследования теплофизических характеристик различных стройматериалов, несомненно, и в дальнейшем будет связано с изучением закономерностей нестационарного температурного поля.

Поступило 5.VIII 1960

Գ. Ա. ԿԱՍՊԱՐՅԱՆ

ՋԵՐՄԱՄԵԿԱՌԻՍԻՉ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ԶԵՐՄԱՆԵԶՐԿԱՎԱՆ  
ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ՈՐՈՇՄԱՆ ԵՂԱՆԱԿՆԵՐԸ

Ա մ փ ո փ ո լ մ

Աշխատանքում բերվում է ջերմամեկուսիչ նյութերի ջերմափոդիկական բնութագրերի էքսպերիմենտալ ուսումնասիրության հիմնական եղանակների համառոտ նկարագրությունը և դրանց վերլուծումը: Փորձարկման ընթացքում նմուշի ջերմափն դաշտի միճակի կապակցությունը բոլոր եղանակները կարող են բաժանվել ստացիոնար սեփմի եղանակի և ոչ ստացիոնար սեփմի եղանակի:

Ստացիոնար սեփմի եղանակների հիմքում ընկած է ստացիոնար ջերմության հոսքի՝ ինչպես ըստ մեծություն, այնպես և ըստ ուղղության պայմանի սահղծումը, ինչպես նաև փորձարկվող նյութի ջերմափն դաշտի կաշունություն պահպանումը:

Ստացիոնար սեփմի եղանակները բնութագրվում են զրվող փորձերի երկարատևությամբ, որը հնարավորություն չի տալիս խոնավ նյութերը ուսումնասիրել, ապարատների բարդությամբ և ջերմահաղորդականության գործակցի որոշման սկզբունքային անհնարինությունը: Ստացիոնար սեփմի եղանակների հետագա զարգացման ասպարեզում նորը և հիմնական ուղղությունը հանդիսանում է՝ սարքերի ղեկավարման ավտոմատացումը, ջերմափն սահմանի ընդլայնումը, ինչպես նաև ճնշման տակ ու փակումում ջերմահաղորդականության գործակցի որոշումը:

Ոչ ստացիոնար սեփմի եղանակները բնութագրվում են նրանով, որ ուսումնասիրվող մարմնի ցանկացած կետի ջերմությունը փոփոխվում է տարածության մեջ և ըստ ժամանակի: Այս եղանակները տալիս են ճիշտ և սրտացում նյութերի աշխատանքի թերմիկ սեփմի փոփոխությունը ըստ ժամանակի՝ իրական պայմաններում: Մինչ այդ, խոնավ մարմիններում ջերմափոխանակումը ուսումնասիրվում էր մասսայի փոխանակումից անկախ, որը, իհարկե, սխալ մտակցում է:

Ուսումնասիրություններով հաստատված է, որ խոնավ մարմիններում նյութի փոխադրությունը անբաժան է ջերմության փոխադրումից՝ նյութի և ջերմության փոխադրման երևույթը պետք է դիտվի իրար հետ առնչված ձևով, որը համապատասխանում է թերմոդինամիկայի անդարձելի պրոցեսների Օնզագերի սկզբունքին: Այդ պատճառով խոնավ նյութերի հետ դրական ջերմաստիճանում տարվող հետազոտությունների զեպքում հարկավոր է կիրառել այնպիսի եղանակներ, որոնք հիմնավորվում են խոնավ նյութերի վրա

ջերմային կարճատև օգգիցությունը: Այս տուժումով անսահմանափակ էստոր-  
նի և ջերմություն ակնթարթային պրոյարի կղանակները ունեն որոշակի  
առավելություններ մյուս կղանակների նկատմամբ: Ոչ ստացիոնար ջերմային  
ռեժիմի կղանակները չստիպանք լայն տարածում են գտել շնորհիվ իրենց  
խիստ տեսական հիմնավորման, պարզություն, ճշտություն, կարճատևություն,  
ինչպես նաև փորձարկման ժամանակ նմուշի ստրակտուրայի խախտման  
բացակայություն (չնչին բացատրություն) պատճառով: Ստացիոնար կղանակ-  
ների հետ համեմատած, ոչ ստացիոնար ռեժիմի կղանակները հիմնականում  
հանդիսանում են արագընթաց և հնարավորություն են տալիս կոմպլեքսային  
ձևով մի սարքի վրա և մի փորձարկումով որոշելու բոլոր ջերմաֆիզիկական  
ընթացիկները:

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Лыков А. В. Теория теплопроводности. Госиздат, 1952.
2. Лыков А. В. Явление переноса в капиллярно-пористых телах. Гостехиздат, 1954.
3. Лыков А. В. Тепло- и массообмен в процессах сушки. Госэнергоиздат, 1956.
4. Кондратьев Г. М. Регулярный тепловой режим. Гостехиздат, 1954.
5. Кауфман Б. Н. Теплопроводность строительных материалов.
6. Михеев М. А. Основы теплопередачи. М.—Л., 1949.
7. Петухов Б. С. Опытное изучение процесса теплопередачи. Энергоиздат, 1952.
8. Тимрот Д. Л. Определение теплопроводности строительных и изоляционных ма-  
териалов. НКПС, Энергоиздат, 1932.
9. Чудновский А. Ф. Теплообмен в дисперсных средах. Гостехтеориздат, 1934.
10. Голянд М. М., Кернов Б. И. Автоматизированные приборы для определения  
коэффициента теплопроводности изоляционных материалов. Сборник трудов  
ЛТИХП, № 4, 1953.
11. Weeks James L., Seifert Ralph L. Apparatus for the measurement of the thermal  
conductivity of solids, Rev. Sei Instrum, 1953, 24, № 11.
12. Wilkes Gordon. Thermal conductivity expansion and specific heat of insulator at  
extremely low temperatures, Refriger. Engin. 1946, 52.
13. Козак М. И. Теплопроводность неметаллических порошков при высоких темпе-  
ратурах. Автореферат диссертации, 1955.
14. Шулъман А. Р., Федоров В. Н., Шенсеньвол М. А. Теплопроводность окиси аммо-  
ния при высоких температурах, Ж. Т. Ф., 1952 г., т. XXII, вып. 8.
15. Шевельков Б. А. Теплофизические характеристики изоляционных материалов. Гос-  
энергоиздат, 1958.
16. Волькенштейн В. С. Скоростной метод определения термических характеристик  
плотных проводников тепла, Ж. Т. Ф. № 6, 1952.
17. Чудновский А. Ф. Метод стыка для определения тепловых свойств тепловых изо-  
ляторов, Ж. Т. Ф., № 2, 1946.
18. Никнетали Н. Probleme der Wärmeübertragung VDJ, 1955, 7, № 34.
19. Hagen C., Pahl G. Messung wärmeleitfähigkeit von Schaumgummi u Kautschuk  
und Gummi. 1954, 7, № 10.
20. Krischer O. Ueber die Bestimmung der wärmeleitfähigkeit, wärmekapazität und der  
wärmedringzahl in einem kurzzeitverfahrench—Ing.-Tech. № 1, 1954.
21. Кулаков М. В. К определению термических коэффициентов твердых термозолото-  
ров, Ж. Т. Ф., № 1, т. XXII, 1952.
22. Кулаков М. В. Исследование тепловых свойств термозолотаторов. Диссертация,  
1951.
23. Кулаков М. В. Исследования тепловых свойств материалов. „Строительная про-  
мышленность“, 1952, № 6.
24. Шевельков В. А. Мясная Индустрия, № 2, 1951.