

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

И.В. ГЕФКЕ, С.Ю. БОНДАРЕНКО

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ
В ЗАДАЧАХ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

Учебно-методическое пособие

БАРНАУЛ 2019

Рецензенты:

кандидат физико-математических наук, профессор кафедры
ФиМОФ ИФМО АлтГПУ А.Д. Насонов;

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры водоот-
ведения и мелиорации ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ Н.И. Алёшина.

Гефке И.В. Физические основы процессов переноса энергии в
задачах природопользования: учебно-методическое пособие / И.В.
Гефке, С.Ю. Бондаренко. Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2019. 52 с.

В учебно-методическом издании рассмотрены основы процес-
сов переноса теплоты, основные факторы, влияющие на теплофизиче-
ские характеристики (ТФХ) почвы, а также методы исследований ТФХ
почвы. Представлено практическое задание, даны варианты для его
выполнения.

Предназначено для магистрантов очного и заочного обучения
по направлению «Природообустройство и водопользование».

Рекомендовано к изданию учебно-методической комиссией
факультета природообустройства ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ (прото-
кол № 1 от --- сентября 2019 г.).

© Гефке И.В., Бондаренко С.Ю., 2019

© ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ _____	4
ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ТЕПЛОТЫ _____	8
ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА _____	12
ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ _____	15
ОСНОВНЫЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЧВЫ _____	23
ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЧВЫ _____	24
МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЧВЫ _____	27
Расчетные методы _____	28
Экспериментальные методы _____	29
ИМПУЛЬСНЫЙ МЕТОД ПЛОСКОГО НАГРЕВАТЕЛЯ _____	31
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ _____	34
ВАРИАНТЫ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ _____	36
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК _____	51

ВВЕДЕНИЕ

Теплопередача или *Теплообмен* – учение о самопроизвольных необратимых процессах распространения теплоты в пространстве.

Под процессом распространения теплоты понимается обмен внутренней энергией между отдельными элементами и между областями рассматриваемой среды. Перенос теплоты осуществляется тремя основными способами: теплопроводностью, конвекцией и тепловым излучением.

Теплопроводность представляет собой молекулярный перенос теплоты в телах (или между ними), обусловленный переменной температурой в рассматриваемом пространстве.

Конвекция возможна только в текучей среде. Под конвекцией теплоты понимают процесс ее переноса при перемещении объемов жидкости или газа (текучей среды) в пространстве из области с одной температурой в область с другой температурой. При этом перенос теплоты неразрывно связан с переносом самой среды.

Тепловое излучение – процесс распространения теплоты с помощью электромагнитных волн, связанный с температурой и оптическими свойствами излучающего тела; при этом внутренняя энергия тела (среды) переходит в энергию излучения. Процесс превращения внутренней энергии вещества в энергию излучения, переноса излучения и его поглощения веществом называется теплообменом излучением. В природе и технике элементарные процессы распространения теплоты – теплопроводность, конвекция и тепловое излучение – очень часто происходят совместно.

Теплопроводность в чистом виде большей частью имеет место лишь в твердых телах.

Конвекция теплоты всегда сопровождается теплопроводностью. Совместный процесс переноса теплоты конвекцией и теплопроводностью называется *Конвективным теплообменом*.

В инженерных расчетах часто исследуют конвективный теплообмен между потоками жидкости или газа и поверхностью твердого тела; этот процесс конвективного теплообмена называют *Конвективной теплоотдачей* или просто *Теплоотдачей*.

Процессы теплопроводности и конвективного теплообмена могут сопровождаться теплообменом излучением. Теплообмен, обусловленный совместным переносом теплоты излучением и теплопроводностью, называют радиационно-кондуктивным теплообменом. Если перенос теплоты осуществляется дополнительно и конвекцией, то такой процесс называют радиационно-конвективным теплообменом. Иногда радиационно-кондуктивный и радиационно-конвективный перенос теплоты называют сложным теплообменом.

В технике и быту часто происходят процессы теплообмена между различными жидкостями (или газами), разделенными твердой стенкой. Процесс передачи теплоты от горячей жидкости к холодной через разделяющую их стенку называется *Теплопередачей*. Теплопередача осуществляется различными процессами теплопереноса. Парогенерирующие трубы котельного агрегата, например, получают теплоту от продуктов сгорания топлива в результате радиационно-конвективного теплообмена. Через слой наружного загрязнения, металлическую стенку и слой накипи теплота передается теплопроводностью. От внутренней поверхности трубы к омывающей ее жидкости теплота передается конвективным теплообменом (теплоотдачей).

Процессы теплообмена могут происходить в различных средах: чистых веществах и разных смесях, при изменении и без изменения агрегатного состояния рабочих сред и т. д. В зависимости от этого теплообмен протекает по-разному и описывается различными уравнениями.

Многие процессы переноса теплоты сопровождаются переносом вещества. Например, при испарении воды в воздух помимо теплообмена происходит и перенос образовавшегося пара в паровоздушной смеси. В общем случае перенос пара осуществляется как молекуляр-

ным, так и конвективным путем. Совместный молекулярный и конвективный перенос массы называют *Конвективным массообменом*. При наличии массообмена процесс теплообмена усложняется. Теплота дополнительно может переноситься вместе с массой диффундирующих веществ.

В общем случае перенос теплоты в смеси различных веществ может вызываться неоднородным распределением других физических величин, помимо температуры. Например, разность концентрации компонентов смеси приводит к дополнительному молекулярному переносу теплоты (диффузионный термоэффект). Обычно перенос теплоты, обусловленный подобными эффектами, сравнительно невелик, и, как правило, им можно пренебречь.

При теоретическом исследовании теплообмена приходится вводить некоторые модельные представления о среде, в которой происходят изучаемые процессы. Рассматриваемые газы, жидкости и твердые тела в подавляющем большинстве случаев считаются сплошной средой, т.е. средой, при рассмотрении которой допустимо пренебречь ее дискретным строением.

Различают однородные и неоднородные сплошные среды. В первых физические свойства в различных точках одинаковы при одинаковых температуре и давлении, в неоднородных средах – различны. Различают также изотропные и анизотропные сплошные среды. В любой точке изотропной среды ее физические свойства не зависят от выбранного направления, наоборот, в анизотропной среде некоторые свойства в данной точке могут быть функцией направления. Наиболее изучен и часто встречается на практике теплообмен в изотропных средах.

Сплошная среда может быть однофазной и многофазной. В однофазной среде, состоящей из чистого вещества или из смеси веществ, свойства изменяются в пространстве непрерывно. В многофазной среде, состоящей из ряда однофазных частей, на границах раздела свой-

ства изменяются скачками. Теплообмен в однофазных и многофазных системах протекает по-разному.

На основании представлений современной физики явления природы вообще и теплопроводности в частности можно описать и исследовать на основе *Феноменологического* и *Статистического методов*.

Метод описания процесса, игнорирующий микроскопическую структуру вещества и рассматривающий его как сплошную среду (континуум), называется феноменологическим.

Феноменологический метод исследования дает возможность установить некоторые общие соотношения между параметрами, характеризующими рассматриваемое явление в целом. Феноменологические законы носят общий характер, а роль конкретной физической среды учитывается коэффициентами, определяемыми из опыта.

Другой путь изучения физических явлений основан на изучении внутренней структуры вещества. Среда рассматривается как некоторая физическая система, состоящая из большого числа молекул, ионов или электронов с заданными свойствами и законами взаимодействия. Получение макроскопических характеристик по заданным микроскопическим свойствам среды составляет основную задачу такого метода, называемого статистическим.

Как первый, так и второй метод обладают своими достоинствами и недостатками.

Феноменологический метод позволяет сразу установить общие связи между параметрами, характеризующими процесс, и использовать экспериментальные данные, точность которых предопределяет и точность самого метода. В этом заключается достоинство использования феноменологического подхода при изучении явления.

Однако сам факт проведения опытов для выявления характеристики физической среды является одновременно и недостатком метода, так как этим ограничиваются пределы применения феноменологических законов. Кроме того, современный эксперимент очень сложен и зачастую является дорогостоящим.

Статистический метод позволяет получить феноменологические соотношения на основании заданных свойств микроскопической структуры среды без дополнительного проведения эксперимента – в этом его достоинство. Недостаток статистического метода – его сложность, в силу чего получить конечные расчетные соотношения возможно лишь для простейших физических моделей вещества. Кроме того, для реализации метода требуется знание ряда параметров, определение которых является предметом исследования специальных разделов физики.

В основу исследования процессов теплопроводности положен феноменологический метод. Аналитическая теория теплопроводности игнорирует молекулярное строение вещества и рассматривает вещество как сплошную среду. Такой подход правомерен, если размеры объектов исследования достаточно велики по сравнению с расстояниями эффективного межмолекулярного взаимодействия.

Всякое физическое явление в общем случае сопровождается изменением в пространстве и времени существенных для данного явления физических величин. Процесс теплопроводности, как и другие виды теплообмена, может иметь место только при условии, если в различных точках тела (или системы тел) температура неодинакова. В общем случае процесс передачи теплоты теплопроводностью в твердом теле сопровождается изменением температуры как в пространстве, так и во времени.

ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ТЕПЛОТЫ

Аналитическое исследование теплопроводности сводится к изучению пространственно-временного изменения температуры, т.е. к нахождению уравнения:

$$T = F(X, Y, Z, t) \quad (1)$$

Уравнение представляет математическое описание *Температурного поля*.

Таким образом, температурное поле есть совокупность значений температуры во всех точках изучаемого пространства для каждого момента времени.

Различают *Стационарное* и *Нестационарное* температурные поля. Уравнение (1) является записью наиболее общего вида температурного поля, когда температура изменяется с течением времени и от одной точки к другой. Такое поле отвечает неустановившемуся тепловому режиму теплопроводности и носит название нестационарного температурного поля.

Если тепловой режим является установившимся, то температура в каждой точке поля с течением времени остается неизменной и такое температурное поле называется стационарным. В этом случае температура является функцией только координат:

$$T = F(X, y, Z) \quad (2)$$

Температурное поле, соответствующее уравнениям (1) и (2), является пространственным, так как температура – функция трех координат. Если температура есть функция двух координат, то поле называется двумерным и его запись имеет вид:

$$T = F(X, y, t) \quad (3)$$

Если температура есть функция одной координаты, то поле называется одномерным:

$$T = f(x, t) \quad (4)$$

Если соединить точки тела, имеющие одинаковую температуру, получим поверхность равных температур, называемую *Изотермической*. Итак, изотермической поверхностью называется геометрическое место точек в температурном поле, имеющих одинаковую температуру.

Так как одна и та же точка тела не может одновременно иметь различные температуры, то изотермические поверхности не пересекаются. Они либо оканчиваются на поверхности тела, либо целиком располагаются внутри самого тела.

Пересечение изотермических поверхностей плоскостью дает на этой плоскости семейство изотерм. Они обладают теми же свойствами, что и изотермические поверхности, т. е. не пересекаются, не обрываются внутри тела, оканчиваются на поверхности либо целиком располагаются внутри самого тела.

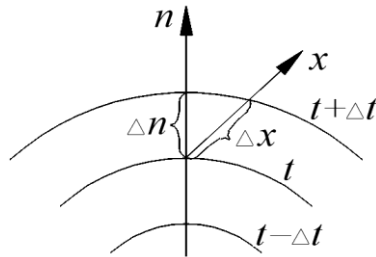


Рисунок 1. Изотермические поверхности

На рисунке 1 приведены изотермы, температуры которых отличаются на dT .

Температура в теле изменяется только в направлениях, пересекающих изотермические поверхности. При этом наибольший перепад температуры на единицу длины происходит в направлении нормали к изотермической поверхности.

Возрастание температуры в направлении нормали к изотермической поверхности характеризуется *Градиентом температуры* – вектором, направленным по нормали к изотермической поверхности в сторону возрастания температуры и численно равным производной от температуры по этому направлению, т.е.:

$$\text{grad}T = n_0 \frac{dT}{dn} \quad (5)$$

где n_0 – единичный вектор, нормальный к изотермической поверхности и направленный в сторону возрастания температуры; dT/dn – производная от температуры по нормали n .

Значение температурного градиента dT/dn не одинаково для различных точек изотермической поверхности. Оно больше там, где расстояние между изотермическими поверхностями меньше.

Необходимым условием распространения теплоты является неравномерность распределения температуры в рассматриваемой среде. Таким образом, для передачи теплоты теплопроводностью необходимо неравенство нулю температурного градиента в различных точках тела.

Согласно *Гипотезе Фурье*, количество теплоты dQ , проходящее через элемент изотермической поверхности dS за промежуток времени $d\tau$, пропорционально температурному градиенту dT/dn :

$$dQ = -\lambda gradT dS d\tau \quad (6)$$

Опытным путем установлено, что коэффициент пропорциональности в уравнении (6) есть физический параметр вещества. Он характеризует способность вещества проводить теплоту и называется *Коэффициентом теплопроводности*.

Количество теплоты, проходящее в единицу времени через единицу площади изотермической поверхности ($Q, \text{Вм}/\text{м}^2$), называется *Плотностью теплового потока*:

$$q = \frac{dQ}{dS d\tau}$$

Вектор плотности теплового потока q направлен по нормали к изотермической поверхности. Его положительное направление совпадает с направлением убывания температуры, так как теплота всегда передается от более горячих частей тела к холодным. Таким образом, векторы q и $gradT$ лежат на одной прямой, но направлены в противоположные стороны. Это и объясняет наличие знака „минус" в правой части уравнения (6).

Линии, касательные к которым совпадают с направлением вектора q , называются *Линиями теплового потока*. Линии теплового потока ортогональны к изотермическим поверхностям.

Скалярная величина вектора плотности теплового потока Q будет равна:

$$q = \lambda |gradT| \quad (7)$$

Многочисленные опыты подтвердили справедливость гипотезы Фурье. Поэтому уравнение (6), так же как и уравнение (7), является математической записью основного закона теплопроводности, который формулируется следующим образом: плотность теплового потока пропорциональна градиенту температуры.

Количество теплоты, проходящее в единицу времени через изотермическую поверхность S , называется *Тепловым потоком*.

Таким образом, для определения количества теплоты, проходящего через какую-либо поверхность твердого тела, необходимо знать температурное поле внутри рассматриваемого тела. Нахождение температурного поля и является главной задачей аналитической теории теплопроводности.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА

Понятие конвективного теплообмена охватывает процесс теплообмена при движении жидкости или газа. При этом перенос теплоты осуществляется одновременно конвекцией и теплопроводностью. Конвекция возможна только в текучей среде, в которой перенос теплоты неразрывно связан с переносом самой среды.

Если в единицу времени через единицу контрольной поверхности нормально к ней проходит масса жидкости $rJ \text{ кг}/(\text{м}^2 \times \text{с})$, где J – скорость, r – плотность жидкости, то вместе с ней переносится плотность теплового потока:

$$\vec{q}_{\text{конв}} = \rho \vec{g} h$$

где h – удельная энтальпия.

Конвекция теплоты всегда сопровождается теплопроводностью, так как при движении жидкости или газа неизбежно происходит соприкосновение отдельных частиц, имеющих различные температуры. В результате конвективный теплообмен описывают уравнением:

$$\vec{q} = \vec{q}_{\text{конд}} + \vec{q}_{\text{конв}} = -\lambda \nabla T + \rho \vec{\mathcal{G}} h \quad (8)$$

Здесь q является локальным (местным) значением плотности теплового потока за счет конвективного теплообмена. Первый член правой части уравнения (8) описывает перенос теплоты теплопроводностью, второй – конвекцией.

Очень часто в инженерных расчетах исследуют теплоотдачу, при этом знание конвективного теплообмена внутри жидкой среды может представить косвенный интерес, поскольку перенос теплоты внутри жидкости отражается и на теплоотдаче.

При расчетах теплоотдачи используют закон Ньютона-Рихмана:

$$dQ = \alpha (T_T - T_{жс}) dS \quad (9)$$

Согласно закону Ньютона-Рихмана, тепловой поток dQ (Bm) от жидкости к элементу поверхности соприкасающегося тела площадью dS (или от dS к жидкости) прямо пропорционален dS и разности температур $dT = T_T - T_{жс}$, где T_T – температура поверхности тела, $T_{жс}$ – температура окружающей жидкой или газообразной среды. Разность температур называют температурным напором.

Коэффициент пропорциональности α , входящий в уравнение (9), называется коэффициентом теплоотдачи. Он зависит от конкретных условий процесса теплоотдачи, влияющих на его интенсивность:

$$\alpha = \frac{dQ}{(T_T - T_{жс}) dS} = \frac{q}{T_T - T_{жс}}$$

Таким образом, коэффициент теплоотдачи есть плотность теплового потока Q на границе жидкости (газа) и соприкасающегося тела, отнесенная к разности температур поверхности этого тела и окружающей среды.

В общем случае коэффициент теплоотдачи переменен по поверхности. Если α и dT не изменяются по S , то закон Ньютона-Рихмана может быть записан следующим образом:

$$Q = \alpha (T_T - T_{жс}) S$$

Коэффициент теплоотдачи зависит от большого количества факторов. В общем случае а является функцией формы и размеров тела, режима движения, скорости и температуры жидкости, физических параметров жидкости и других величин. По-разному протекает процесс теплоотдачи в зависимости от природы возникновения движения жидкости.

Чтобы привести жидкость в движение, к ней необходимо приложить силу. Силы, действующие на какой-либо элемент жидкости, можно разделить на массовые (или объемные) и поверхностные. Массовыми называются силы, приложенные ко всем частицам жидкости и обусловленные внешними силовыми полями (например, гравитационным или электрическим). Поверхностные силы возникают вследствие действия окружающей жидкости или твердых тел, они приложены к поверхности контрольного объема жидкости. Такими силами являются силы внешнего давления и силы вязкого трения.

Различают свободную и вынужденную конвекцию. В первом случае движение в рассматриваемом объеме жидкости возникает за счет неоднородности в нем массовых сил. Если жидкость с неоднородным распределением температуры и, как следствие, с неоднородным распределением плотности находится в поле земного тяготения, может возникнуть свободное гравитационное движение.

Вынужденное движение рассматриваемого объема жидкости происходит под действием внешних поверхностных сил, приложенных на его границах, за счет предварительно сообщенной кинетической энергии (например, за счет работы насоса, вентилятора, ветра). Как вынужденное рассматривается и течение изучаемого объема жидкости под действием однородного в нем поля массовых сил. Иллюстрацией последнего может являться течение изотермической пленки жидкости по стенке под действием силы тяжести.

Вынужденное движение в общем случае может сопровождаться свободным движением. Относительное влияние последнего тем больше, чем больше разность температур отдельных областей среды и чем

меньше скорость вынужденного движения. При больших скоростях вынужденного движения влияние свободной конвекции становится пренебрежимо малым.

В стационарных процессах течения и теплоотдачи скорости и температуры в любой точке жидкости (газа) неизменны во времени.

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Процессы лучистого теплообмена получили широкое распространение в теплотехнике, ядерной энергетике, ракетной технике, металлургии, сушильной технике, химической технологии, светотехнике, гелиотехнике и др.

Тепловое излучение представляет собой процесс распространения внутренней энергии излучающего тела с помощью электромагнитных волн. При поглощении электромагнитных волн какими-либо другими телами они вновь превращаются в энергию теплового движения молекул. Электромагнитное излучение всех длин волн обуславливается колебаниями электрических зарядов, входящих в состав вещества, т. е. электронов и ионов. При этом колебания ионов, составляющих вещество, соответствуют излучению низкой частоты (инфракрасному) вследствие значительной массы колеблющихся зарядов. Излучение, возникающее в результате движения электронов, может иметь высокую частоту (видимое и ультрафиолетовое излучение), если эти электроны входят в состав атомов или молекул и, следовательно, удерживаются около своего положения равновесия значительными силами. В металлах свободные электроны испытывают нерегулярное торможение, и их излучение приобретает характер *Импульсов*, т. е. характеризуется спектром различных длин волн, среди которых могут быть и волны низкой частоты.

Большинство твердых и жидких тел имеет сплошной (непрерывный) спектр излучения, т. е. излучают энергию всех длин волн – от 0 до ∞ . К твердым телам, имеющим непрерывный спектр излучения, от-

носятся непроводники и полупроводники электричества, металлы с окисленной шероховатой поверхностью. Металлы с полированной поверхностью, газы и пары характеризуются селективным (прерывистым) спектром излучения. Интенсивность излучения зависит от природы тела, его температуры, длины волны, состояния поверхности, а для газов – еще от толщины слоя и давления. Твердые и жидкие тела имеют значительные поглощательную и излучательную способности. Вследствие этого в процессах лучистого теплообмена участвуют лишь тонкие поверхностные слои: для непроводников теплоты они составляют около 1 мм, для проводников теплоты – 1 мкм. Поэтому в этих случаях тепловое излучение приближенно можно рассматривать как поверхностное явление. Полупрозрачные тела (плавленый кварц, стекло, оптическая керамика и т. п.), а также газы и пары характеризуются объемным характером излучения, в котором участвуют все частицы объема вещества. Излучение всех тел зависит от температуры. С увеличением температуры тела его энергия излучения увеличивается, так как увеличивается внутренняя энергия тела. При этом изменяется не только значение этой энергии, но и спектральный состав. При увеличении температуры повышается интенсивность коротковолнового излучения и уменьшается интенсивность длинноволнового излучения. В процессах излучения зависимость от температуры значительно большая, чем в процессах теплопроводности и конвекции. Вследствие этого при высоких температурах основным видом переноса может быть тепловое излучение.

Излучение тела сопровождается потерей энергии. Для того чтобы обеспечить возможность длительного излучения энергии, необходимо пополнять убыль ее; в противном случае излучение будет сопровождаться какими-либо изменениями внутри тела, и состояние излучающей системы будет непрерывно изменяться. Указанные процессы могут быть весьма разнообразны, и, следовательно, может быть различен и характер свечения.

Известны процессы излучения, сопровождающие химические превращения внутри тела, – так называемая *Хемилюминесценция*. Сюда относится, например, свечение гниющего дерева или свечение фосфора, медленно окисляющегося на воздухе. В этом случае испускание лучистой энергии идет параллельно с изменением химического состава вещества и уменьшением запаса его внутренней энергии.

Процессы излучения, вызываемые освещением тела, называются фотолюминесценцией. В данном случае для поддержания свечения необходимо подводить к телу энергию в виде излучения, поступающего от внешнего источника.

Весьма распространен способ возбуждения свечения путем электрического воздействия на излучающую систему. Свечением такого рода (электролюминесценция) является свечение газов или паров под действием проходящего через них электрического разряда, который может иметь разнообразные формы: тлеющий разряд, электрическая дуга, искра. Во всех таких случаях энергия, необходимая для излучения, сообщается атомам и молекулам газа путем бомбардировки электронами, разгоняемыми электрическим полем разряда. Бомбардировка электронами может вызвать также свечение твердых тел, например, минералов (*катодолюминесценция*).

Наконец, можно заставить тело светиться, сообщая ему необходимую энергию нагреванием. И в этом случае можно поддерживать излучение неизменным, если убыль энергии, уносимой излучением, пополнять сообщением соответствующего количества тепла. Последний вид свечения наиболее распространен и называется *Тепловым излучением*. Собственно говоря, такое тепловое излучение имеет место и при низких температурах (например, при комнатной), но только в этих условиях излучение практически ограничивается лишь очень длинными инфракрасными волнами.

Тепловое излучение тел можно противопоставить всем иным видам излучения в силу некоторых его особенностей.

Предположим, что излучающее тело окружено идеально отражающей, непроницаемой для излучения оболочкой. Тогда излучение, испускаемое телом, не рассеивается по всему пространству, а, отражаясь стенками, сохраняется в пределах полости, падая вновь на излучающее тело и в большей или меньшей степени вновь им поглощаясь. В таких условиях никакой потери энергии наша система – излучающее тело и излучение – не испытывают. Однако это еще не значит, что испускающее тело и излучение находятся в равновесии между собой. Энергия системы содержится частично в виде энергии излучения (электромагнитных волн), частично в виде внутренней энергии излучающего тела. Состояние системы будет равновесным, если с течением времени распределение энергии между телом и излучением не меняется. Поместим внутрь полости нагретое тело (твердое, жидкое или газообразное). Если в единицу времени тело больше испускает, чем поглощает (или наоборот), то температура его будет понижаться (или повышаться). При этом будет ослабляться или усиливаться испускание, пока не установится равновесие. Такое равновесное состояние устойчиво. После всякого нарушения его, в силу описанного механизма, вновь восстановится равновесное состояние.

Наоборот, излучение, возбуждаемое не нагреванием, а какими-либо другими процессами, не будет равновесным. Пусть, например, излучение имеет характер хемилюминесценции, т.е. сопровождается какой-то процесс химического изменения вещества. Поглощение большей или меньшей доли испущенной световой энергии не вернет вещество в его первоначальное состояние. Более того, повышение температуры, вызванное поглощением тепла, обычно ведет лишь к более энергичному протеканию химической реакции. Процесс непрерывного изменения излучающей системы будет продолжаться до тех пор, пока может идти химическая реакция, и, следовательно, система все больше и больше удаляется от первоначального состояния. Равновесие установится только тогда, когда закончится химический процесс, а с ним и хемилюминесценция, и характер установившегося излучения будет

определяться температурой тела, т. е. равновесное состояние будет соответствовать опять-таки тепловому излучению.

То же справедливо и при фотолюминесценции. Внесем в зеркальную полость какое-нибудь фосфоресцирующее вещество, предварительно возбужденное освещением. Свечение нашего тела будет постепенно ослабевать; действительно, свет фосфоресценции, отраженный зеркальными стенками, может частично поглощаться веществом и нагревать его; однако он не сможет поддерживать длительной фосфоресценции, для возбуждения которой требуется освещение светом более короткой длины волны, чем испускаемый свет (закон Стокса). Значит, и в данном случае будут иметь место постепенное нагревание тела за счет света фосфоресценции и постепенная замена этого излучения тепловым излучением нагретого тела, т.е. излучением, интенсивность и спектральный состав которого определяются температурой тела. Аналогично будет затухать свечение, вызванное кратковременным электрическим разрядом, и заменяться тепловым излучением, соответствующим установившейся температуре системы.

Таким образом, равновесное излучение всегда имеет характер теплового излучения, причем такое равновесие между излучением и веществом может иметь место для любого тела (твердого, жидкого, газообразного). Это тепловое, или равновесное, излучение подчиняется определенным общим закономерностям, вытекающим из принципов термодинамики, в силу которых установившееся тепловое равновесие изолированной системы не может нарушиться вследствие излучения какими-либо частями данной системы или вследствие каких-либо других тепловых обменов. Тепловое излучение иногда называют *Температурным*.

Тепловое излучение имеет сплошной спектр, однако распределение энергии в нем существенно зависит от температуры: при низких температурах тепловое излучение является преимущественно инфракрасным, при высоких температурах – видимым и ультрафиолетовым.

Нагревая, например, металл, мы видим появление темно-красного свечения при температуре около 500°C . По мере повышения температуры свечение становится ярче и обогащается более короткими волнами, переходя примерно при 1500°C в яркое белое каление.

Другая важнейшая черта температурного излучения следующая. Спектральный состав излучения, соответствующего данной температуре, для различных хорошо поглощающих веществ (например, окислов различных металлов, угля и т. д.) практически одинаков, но для прозрачных тел излучение может иметь отличный состав. Так, нагревая кусок стали, при температуре около 800°C можно увидеть яркое вишнево-красное каление, тогда как прозрачный стерженек плавленого кварца при той же температуре совсем не светится, не испускает видимых (в частности, красных) лучей. Таким образом, обнаруживается большая способность к излучению тел, хорошо поглощающих. Это обстоятельство определяет условия обмена лучистой энергией, ведущего к установлению теплового равновесия между телами.

Опыт показывает, что тела различной температуры, могущие передавать друг другу тепло, по истечении некоторого времени принимают одинаковую температуру, т. е. приходят в тепловое равновесие. Это происходит и в том случае, когда тела заключены в непроницаемую для тепла оболочку, в которой создан вакуум, т. е. исключена возможность теплового обмена в силу теплопроводности и конвекции, и имеет место лишь излучение и поглощение. Излучая и поглощая тепло, тела, в конце концов, принимают одинаковую температуру T . Тепловое равновесие имеет динамический характер, т. е. и при одинаковых температурах всех тел происходит, конечно, излучение и поглощение лучистой энергии, но так, что в единицу времени тело столько же излучает тепла, сколько оно его поглощает. Отсюда ясно, что если два тела обладают различной способностью к поглощению, т.е. *Поглощают разные количества энергии, то и испускание должно быть различно* (Прево, 1809 г.).

Нетрудно подтвердить это заключение простыми опытами. В качестве излучателя возьмем наполненную горячей водой коробку (рис. 1), плоские стенки которой обладают различной способностью к поглощению: одна сделана из хорошо полированного металла и поглощает очень мало, а другая покрыта черным слоем окисла и почти нацело поглощает падающую на нее энергию. В качестве приемника удобно использовать воздушный термометр, резервуар которого Q также представляет собой металлическую коробку со стенками из различного материала. По расширению воздуха в Q можно судить о количестве поступающего за единицу времени тепла. Поворачивая сосуд G к термометру (или Q к излучателю) блестящей или черной стороной, можно убедиться, что блестящая поверхность меньше излучает и меньше поглощает, чем черная. Сделав термометр дифференциальным, и придав всему расположению вид, изображенный на втором рисунке, мы заметим, что капля в дифференциальном термометре остается на месте, т.е. оба резервуара Q_1 и Q_2 получают одинаковое количество тепла. В таком видоизменении этот опыт позволяет заключить, что поглощательная способность какой-либо поверхности пропорциональна ее испускательной способности.

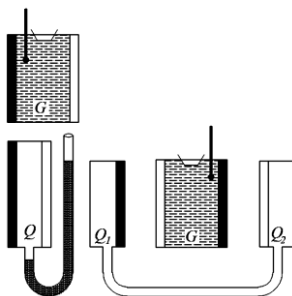


Рисунок 2. Приборы для демонстрации правила Прево

G – излучающий сосуд; Q – воздушный термометр.

Правило Прево, устанавливающее связь между способностью тела поглощать и излучать тепло, имело качественный характер. Полстолетия спустя Кирхгоф (1859г.) придал ему вид строгого количе-

ственного закона, играющего основную роль во всех вопросах теплового излучения.

При падении на поверхность какого-либо тела лучистого потока наблюдаются следующие явления:

- а) часть потока отражается обратно в окружающее пространство. При этом происходит или зеркальное отражение, или поверхностное рассеяние потока в зависимости от структуры поверхности тела;
- б) часть потока проходит через тело;
- в) остальная часть потока поглощается телом, и его энергия превращается в другие виды энергии.

Величина r , равная отношению лучистого потока F_r , отраженного телом, к лучистому потоку F , падающему на поверхность тела, называется *Коэффициентом отражения*:

$$R = F_r / F$$

Величина t , равная отношению лучистого потока F_t , прошедшего через данное тело (среду), к лучистому потоку F , падающему на данное тело (среду), называется *Коэффициентом пропускания*

$$T = F_t / F$$

Величина a , равная отношению лучистого потока F_a , поглощенного телом, к лучистому потоку, падающему на тело, называется *коэффициентом поглощения тела*

$$A = F_a / F$$

Из закона сохранения энергии следует, что:

$$F_r + F_t + F_a = F, \text{ поэтому } r + t + a = 1.$$

Измерения показывают, что коэффициенты поглощения, пропускания и отражения тела зависят от длины волны падающего излучения и от температуры тела.

Для монохроматического излучения они называются *Спектральными коэффициентами* поглощения, пропускания и отражения и обозначаются (для данной температуры тела) r_t , t_t , a_t .

Зависимость коэффициентов r , t , a от длины волны является во многих случаях причиной окрашенности тел, не излучающих соб-

ственного света. Если тело при освещении его белым светом имеет красный цвет, то его коэффициент поглощения для коротковолновой части видимого спектра близок к единице, а для длинноволновой – к нулю. Соответственно коэффициент отражения этого тела для красных лучей близок к единице, а для зелено-фиолетовых – близок к нулю.

Цвет тела существенно зависит и от спектрального состава падающего на него света. При освещении указанного тела синим светом оно будет казаться почти черным, так как синие лучи ими почти полностью поглощаются. Окраска прозрачных тел также определяется зависимостью коэффициента пропускания от длины волны. Например, вещество, сильно поглощающее все лучи, кроме синих, будет играть роль фильтра, выделяющего из белого света только синие лучи. Можно подобрать различные вещества, из которых одни пропускают только красные лучи, другие – только синие и т. д., причем остальные лучи поглощаются. Такие вещества употребляются для изготовления светофильтров. Их вводят или прямо в состав стекла, или в слои желатины (или прозрачной пластмассы), которые помещаются между двумя обычными стеклами.

ОСНОВНЫЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЧВЫ

Формирование гидротермического режима в почвенном профиле определяется ее теплофизическими показателями: объемной теплоемкостью (C_p), теплопроводностью (λ) и температуропроводностью (a).

Объемная теплоемкость (C_p) характеризует почву с точки зрения способности ее к нагреву или охлаждению, под воздействием сообщаемой ей теплоты, являясь величиной, равной количеству тепла, необходимого для изменения температуры 1 м^3 почвы на один градус. Единицей измерения объёмной теплоемкости в СИ является $1(\text{Дж}/\text{м}^3 \cdot \text{К})$.

Коэффициент теплопроводности (λ) характеризует почву с точки зрения способности ее проводить тепло, представляя собой величину, равную количеству тепла, переносимому почвой в единицу времени через единицу площади при градиенте температуры, равном единице. Единицей измерения коэффициента теплопроводности в СИ является 1 ватт на кельвин-метр $1 (Вт/К\cdot м)$

Коэффициент температуропроводности (a) численно равен коэффициенту теплопроводности образца почвы с объемной теплоемкостью, равной единице. Единицей измерения коэффициента температуропроводности в СИ является 1 метр в квадрате на секунду $1 (м^2/с)$.

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЧВЫ

Характер теплофизических характеристик почвы формируется под воздействием четырех факторов: кондуктивной, конвективной, радиационной и массообменной проводимости.

Кондукция (теплопередача) – физический процесс передачи тепловой энергии от более горячего тела к более холодному либо непосредственно (при контакте), либо через разделяющую (тела или среды) перегородку из какого-либо материала.

Кондуктивная теплопроводность в такой типичной дисперсной среде, как почва, зависит от *структурной модели*, под которой имеется в виду система взаимного расположения твердых частиц и пор, от *химико-минералогического состава* твердой фазы почвы, от *соотношения* между объемом промежуточной среды (газ, влага) и общим объемом системы, т.е. от ее пористости, влажности и температуры почвы.

Конвекция – явление переноса теплоты жидкостями или газами, путем их перемешивания (как вынужденно, так и самопроизвольно). В почвах рассматривается естественная конвекция, которая возникает

самопроизвольно при неравномерном нагревании веществ в поле тяготения.

При, обычно распространенных размерах почвенных пор и частиц в 0,1-0,2 мм, процент общей теплопередачи за счет *конвекции* лежит в пределах 0,15-0,3% и только для весьма крупных частиц и пор, порядка 3,0 мм этот процент доходит до 5-5,5% при максимально возможном перепаде температур. В почвах проявление этого механизма заметно лишь при высокой влажности и быстром перемешивании свободной воды.

Радиационная проводимость – превращение внутренней энергии вещества в энергию излучения (энергию фотонов, или электромагнитных волн), перенос этого излучения в пространстве и его поглощение другим веществом.

В реальных условиях, когда почва не нагревается выше 60°C, роль *радиационного* теплообмена пренебрежимо мала.

Массообмен предполагает перемещение влаги в почве, как в форме пара, так и в капельно-жидком виде. Этот поток влаги переносит с собой тепло, которое изменяет режим теплопереноса и влияет на величину теплофизических характеристик почвы.

Характер изменения теплофизических свойств генетических горизонтов в почвенном профиле и динамика этих свойств во времени и пространстве в значительной степени определяются влажностью, плотностью или пористостью (порозность) и механическим составом.

Теплоемкость почвы складывается из теплоемкостей составляющих ее почвенных фаз: твердой ($C_{\rho s}$), воды ($C_{\rho w}$) и воздуха ($C_{\rho a}$). Тепло будет равномерно распределяться в трехфазной почвенной системе по всем ее фазам, нагревая их в соответствии с теплоемкостью каждой из фаз и ее долей в почве. Теплоемкость почвы (C_{ρ}), в целом составит:

$$C_{\rho} = f_s C_{\rho s} + f_w C_{\rho w} + f_a C_{\rho a}. \quad (10)$$

где: f_s, f_w, f_a - объемные доли твердой фазы, воды и воздуха.

Объемная теплоемкость абсолютно сухой почвы от пахотного горизонта к нижележащим, увеличивается, что вызвано главным образом значительным повышением объемного веса (плотность) почвы вниз по профилю.

Теплофизические параметры зависят от влажности почвы. Можно выделить **три характерные области**, соответствующие различным энергетическим состояниям почвенной влаги (рисунок 3).

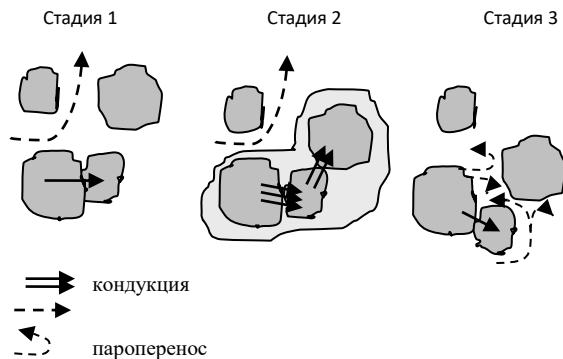


Рисунок 3. Схема теплопереноса при различной степени влажности

1. В области **низких влажностей** вода прочно связана, и процессы теплообмена определяются исключительно кондуктивным механизмом переноса тепла в почве. С увеличением влажности растет площадь стыковых манжет и, соответственно, величина кондуктивной теплопроводности. Одновременно увеличивается и объемная теплоемкость, линейно зависящая от влажности. Рост теплопроводности компенсируется ростом теплоемкости, а температуропроводность в это время практически не зависит от влажности.

2. Пародиффузионный перенос достигает своего максимума: теплопроводность возрастает быстрее, чем объемная теплоемкость. Температуропроводность увеличивается с влажностью.

3. При дальнейшем повышении влажности появляется капиллярная влага, заполняющая почвенные капилляры. Теплообмен сводится к кондуктивной теплопередаче и к слабо выраженной в почве конвек-

ции. В результате рост теплопроводности замедляется. Поскольку объемная теплоемкость продолжает увеличиваться с влажностью, температуропроводность начинает снижаться. Она достигает максимума в области влажностей, близких к влажности разрыва капилляров (ВРК) (рисунок 4).

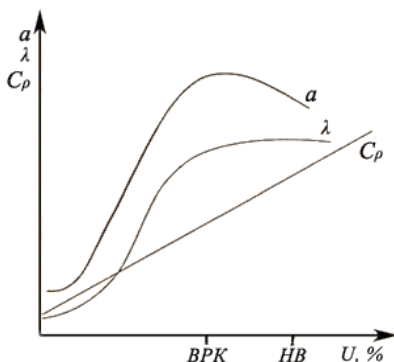


Рисунок 4. Зависимости теплофизических параметров от влажности

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЧВЫ

Методы определения теплофизических характеристик почвы можно разделить на две категории: **расчетные** и **экспериментальные**.

Расчетные методы

В расчетных методах определения коэффициентов температуропроводности и теплопроводности обычно используется метод анализа температурной волны, изменение которой в почве считается синусоидальным. При этом с учетом естественного распределения температур почвы по глубине и во времени коэффициент температуропроводности рассчитывается по уравнению:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau}(z, \tau) = \alpha \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}(z, \tau) \quad (11)$$

где t – температура почвы; τ – время; z – глубина почвы.

Этот способ расчета температуропроводности почвы имеет недостатком то, что изменение температуры на поверхности почвы нельзя считать синусоидальным.

Вместо запаздывания фаз с глубиной, используют явление затухания по профилю почвы амплитуды гармонических колебаний температуры в течение суток.

Коэффициент температуропроводности почв вычисляют по осредненным температурам, однако, для мерзлых (а, следовательно, и влажных) почв, этот способ расчета применить нельзя из-за наличия внутренних источников тепла (скрытой теплоты плавления или парообразования).

Таким образом, расчетные методы лишь приближенно отражают процесс теплопередачи в почве, так как в некоторых из них суточные и годовые температуры считаются гармоническими (синусоидальными), а в других не учитывается изменение объемного веса и влажности реальной почвы. Эти методы не учитывают влияние фазовых превращений влаги на теплофизические свойства почвы.

Поэтому, в настоящее время экспериментальные методы определения теплофизических коэффициентов почв являются основными и позволяют получать более объективные данные.

Экспериментальные методы

В зависимости от характера изменения температуры во времени все экспериментальные методы определения теплофизических характеристик делятся на *стационарные* и *нестационарные*.

Стационарные методы основаны на закономерностях постоянного во времени температурного поля. При этом тепловой поток, проходящий через исследуемый объект, сохраняется постоянным по величине и по направлению. Изменение температуры в направлении потока тепла описывается линейной зависимостью, а температурный градиент в объеме всего образца не меняется. В связи с этим, исходя из закона Фурье утверждающего, что тепловой поток пропорционален

градиенту температуры, можно определить коэффициент теплопроводности по уравнению:

$$q = -\lambda \nabla t \quad (12)$$

где: q – поток тепла; ∇t – градиент температуры.

Следовательно, чтобы определить коэффициент теплопроводности почвы по уравнению (12), нужно измерить тепловой поток и температурный градиент.

Существующие стационарные методы отличаются друг от друга размещением нагревателей, конструкцией применяемых приборов, формами и размерами испытуемых образцов и т.д. Они позволяют наиболее точно определить коэффициент теплопроводности образцов. Однако сложная аппаратура, большая продолжительность опытов и возможность определения только коэффициента теплопроводности и только в образцах, находящихся в сухом состоянии, существенно ограничивают применение стационарных методов.

Поэтому в настоящее время, в теплофизике широко распространены нестационарные методы определения теплофизических коэффициентов, основанные на закономерностях нестационарного теплового потока.

Нестационарные методы исследования тепловых свойств имеют ряд преимуществ по сравнению со стационарными. Они дают более широкие возможности в отношении выбора источников теплоты, чем стационарные, являются, как правило, быстро протекающими во времени, часто не требуют значительного времени на предварительную выдержку образцов при определенной температуре. Относительно малая затрата времени на проведение эксперимента снижает требования к тепловой защите опытного образца от теплообмена с окружающей средой. Эти методы широко используются при исследовании тепловых свойств почвы. Существует три разновидности нестационарных методов.

Одну из них составляют *методы регулярного теплового режима*. Регулярным режимом считают случаи, когда тело вступает в упорядо-

ченное тепловое состояние, характеризующееся определенной закономерностью (чаще логарифмической) изменения температуры исследуемой точки среды.

Квазистационарные методы – следующая разновидность нестационарных. Квазистационарным режимом нагрева и охлаждения тела называют такой режим, когда температура любой точки тела является линейной функцией времени, а распределение температуры по сечению тела описывается законом параболы.

Третью разновидность экспериментальных методов определения теплофизических коэффициентов образуют *импульсные* или *методы мгновенного и равномерно действующего источника тепла*. Они основаны на определении параметра нестационарного температурного поля в первой стадии его развития.

Основными достоинствами импульсных методов являются простота установки, возможность определения всех теплофизических характеристик из одного опыта.

ИМПУЛЬСНЫЙ МЕТОД ПЛОСКОГО НАГРЕВАТЕЛЯ

В импульсных методах определения теплофизических характеристик использованы закономерности выравнивания температурного поля в неограниченной среде после прекращения действия источника тепла.

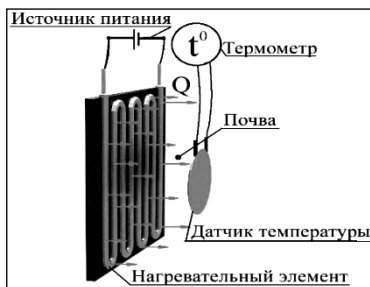


Рисунок 5. Установка для измерения теплофизических коэффициентов импульсным методом

Установка обычно состоит из исследуемого образца, нагревательного элемента и датчика температуры. Часть образца, находящаяся между нагревательным элементом и датчиком температуры, является исследуемым участком, при этом, необходимо обеспечивать хороший тепловой контакт нагревателя и датчика с исследуемыми образцами почвы.

Характерной особенностью любого импульсного метода является наличие максимума температуры t_m исследуемой точки среды после прекращения действия источника тепла. Время τ_m наступления максимума и его величина зависят от теплофизических параметров среды и определяются на основе решения уравнения Фурье с известными граничными условиями.

В общем случае (при $\tau_n \rightarrow 0$, $c_n \rightarrow 0$) взаимосвязь величин τ_m , x и a имеет простой вид:

$$\tau_m = \frac{x^2}{2a} \quad (13)$$

где: τ_n – время действия нагревателя, c_n – теплоемкость нагревателя, x – расстояние от нагревателя до датчика температуры.

Однако, при использовании формулы (13) для расчета коэффициента температуропроводности, невозможно выполнить условие, при котором время действия источника тепла стремится к нулю. Данную зависимость можно применить только тогда, когда время действия нагревателя τ_n много меньше интервала времени τ_m от начала процесса до появления максимума температуры в исследуемой точке образца. В этом случае, импульс тепла от нагревателя принимают "мгновенным". Уменьшение τ_n и увеличение расстояния от нагревателя до исследуемой точки также является необходимым условием для того, чтобы считать время действия источника тепла равным нулю.

Уменьшить τ_n можно при одновременном повышении мощности нагревателя. Однако это приведет к значительному увеличению температуры почвы в прилегающих к нагревателю слоях и заметному из-

менению ее термических свойств. Для преодоления этих трудностей предложены зависимости, учитывающие время действия нагревателя. На основе решения уравнения теплопроводности получены зависимости для расчета коэффициента температуропроводности капиллярно-пористых сред. Эти зависимости дают хорошую сходимость результатов только для больших расстояний от нагревателя. При расстояниях меньше 9,5 мм разница между полученными значениями температуропроводности достигает 50%.

На основе решения системы дифференциальных уравнений:

$$C_H \rho_H \frac{\partial t_H}{\partial \tau} = \lambda_H \frac{\partial^2 t_H}{\partial x^2} + W \quad (14)$$

$$C_p \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \quad (15)$$

получена формула для определения температуропроводности с учетом времени действия нагревателя:

$$a = \frac{x^2}{2 \left(\tau_m - \frac{\pi}{4} \tau_H \right)} \quad (16)$$

где: C_H, C – удельные теплоемкости нагревателя и исследуемой среды, ρ_H, ρ – плотности материала нагревателя и среды, λ_H, λ – теплопроводности нагревателя и среды, t_H, t – температуры нагревателя и среды, W – удельная мощность нагревателя.

Но использование зависимости (16) возможно только для условий, когда теплоемкость нагревателя равна нулю и все тепло передается в исследуемый образец. Реальный же нагреватель всегда имеет некоторую теплоемкость, поэтому часть энергии расходуется на повышение температуры самого источника тепла. Определены условия, когда с определенной погрешностью можно пренебречь теплоемкостью нагревателя. Для выполнения этих условий нужно уменьшать до минимума теплоемкость источника тепла C_H . Однако, снижение теплоемкости приводит к тому, что количество энергии, выделяемой нагревателем, будет мало, а температура исследуемой точки образца изменит-

ся незначительно. В результате, возрастает ошибка в измерении τ_m , а, следовательно, и объемной теплоемкости C_ρ . Для увеличения температуры опять же необходимо повысить мощность нагревателя, что приведет к изменению теплофизических характеристик слоев испытуемого образца, прилегающих к нагревателю. Особенно заметен этот эффект во влажных образцах. Уменьшить проявление указанных воздействий можно путем увеличения собственной теплоемкости источника тепла C_H . Но в этом случае необходимо иметь расчетные формулы, учитывающие ее.

Зависимость для определения объемной теплоемкости капиллярно-пористых тел с учетом собственной теплоемкости нагревателя была получена А.И. Луниным (1972г.):

$$C_\rho = \frac{Q}{Sx\Delta t_m} S_i \left(\frac{Q}{C_H t_m} \right) \quad (17)$$

Для нахождения коэффициента температуропроводности была предложена следующая формула:

$$a = \frac{x^2}{\tau_m - \frac{\pi}{4} \tau_H} \left(0,5 + 0,968 \frac{C_H}{Sx C_\rho} \right) \quad (18)$$

где: Q – количество теплоты, выделенное нагревателем, S_i – интегральный функционал, S – площадь нагревателя, x – расстояние между датчиком температуры и нагревателем, Δt_m – разность температур между максимальной и начальной, C_H – теплоемкость нагревателя, τ_m – время наступления максимума, τ_H – время действия нагревателя.

Эти закономерности и лежат в основе импульсных методов определения теплофизических коэффициентов различных материалов. Для нахождения температуропроводности и объемной теплоемкости образца измеряется время действия нагревателя τ_m , максимальное изменение температуры $\Delta t_m = t_m - t_0$, время τ_m появления этого максимума на расстоянии x от источника тепла и количество энергии Q , выделенное нагревателем.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

Определить теплофизические характеристики различных образцов почв, согласно исходным данным, разработанным по вариантам. Построить графики и проанализировать характер взаимозависимостей этих характеристик.

Рекомендации к выполнению задания:

1. Подготовьте таблицу для записи результатов вычислений:

Влажность, %						
Тепло- физические характеристики						
Теплоемкость $C_p, 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$						
Температуропроводность $a, 10^{-6} (\text{м}^2/\text{с})$						
Теплопроводность $\lambda, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$						

2. По данным таблиц варианта, постройте графики зависимости разности температур (Δt) от времени (τ): $\Delta t = f(\tau)$, для каждой из влажностей.

3. По графикам определите температуру максимума (Δt_m) и время его наступления (τ_m) для различной влажности почвы.

4. Рассчитайте количество теплоты, выделенное нагревателем по формуле:

$$Q = \frac{u^2}{R} \tau_n$$

5. По формуле (17), рассчитайте значения теплоемкости (C_p) почвы для каждой из влажностей.

В расчетах принять: $S_i \left(\frac{Q}{c_H t_m} \right) = 0,242$

6. Используя формулу (18), определите температуропроводность (a) почвы для каждой из влажностей.

7. Рассчитайте теплопроводность почвенных образцов для разных значений влажности по формуле:

$$\lambda = a \cdot C_p$$

8. Постройте график зависимости объемной теплоемкости (C_p) от влажности (U): $C_p = f(U)$.

9. Постройте график зависимости температуропроводности (a) от влажности (U): $a = f(U)$.

10. Постройте график зависимости теплопроводности (λ) от влажности (U): $\lambda = f(U)$.

11. Сделайте вывод о зависимости теплофизических характеристик почвы от влажности.

ВАРИАНТЫ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ

Вариант – 1

Влажность, U(%) Время τ (сек)	0	5	10	20	30	40
	Разность температур, Δt ($^{\circ}\text{K}$)					
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	0,04	0,03	0,02	0,14	0,09	0,00
60	0,56	0,46	0,37	0,93	0,73	0,30
90	0,93	0,89	0,86	1,11	0,95	0,80
95	0,98	0,95	0,96	1,10	0,94	0,83
100	1,05	1,00	1,14	1,08	0,92	0,82
110	1,16	1,09	1,33	1,04	0,88	0,79
120	1,23	1,18	1,36	0,99	0,84	0,74
150	1,44	1,39	1,27	0,84	0,71	0,59
180	1,62	1,54	1,16	0,72	0,63	0,49
210	1,74	1,49	1,04	0,66	0,58	0,44
240	1,77	1,37	0,95	0,62	0,54	0,40
270	1,65	1,28	0,89	0,60	0,52	0,37

Напряжение, подаваемое на нагреватель- ный элемент, u (В)	Сопротив- ление нагрева- тельного элемента, R (Ом)	Время действия нагрева- теля, τ_n (сек.)	Площадь нагрева- тельного элемента, S (m^2)	Расстояние между пла- стиной и датчиком, x (м)	Теплоемкость нагревателя, C_n $10^6(\text{Дж})/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
20	87	60	0,002	0,006	6,0

Вариант – 2

Влажность, U(%) Время, τ (сек)	0	5	10	20	30	40
	Разность температур, Δt (°K)					
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	0,08	0,06	0,04	0,27	0,17	0,00
60	1,06	0,87	0,70	1,77	1,39	0,57
90	1,77	1,68	1,63	2,11	1,81	1,52
95	1,87	1,80	1,83	2,09	1,79	1,58
100	2,00	1,90	2,16	2,05	1,75	1,56
110	2,19	2,06	2,52	1,97	1,68	1,49
120	2,34	2,24	2,58	1,88	1,59	1,41
150	2,74	2,64	2,42	1,60	1,35	1,13
180	3,07	2,93	2,20	1,37	1,20	0,93
210	3,30	2,83	1,98	1,26	1,10	0,83
240	3,36	2,61	1,80	1,18	1,02	0,77
270	3,13	2,43	1,69	1,14	0,98	0,71

Напряжение, подаваемое на нагревательный элемент, u (В)	Сопротивление нагревательного элемента, R (Ом)	Время действия нагревателя, τ_n (сек.)	Площадь нагревательного элемента, S (м ²)	Расстояние между пластиной и датчиком, x (м)	Теплоемкость нагревателя, C_n 10 ⁶ (Дж)\(м ³ ·К)
22	94	60	0,0025	0,0055	5,85

Вариант – 3

Влажность, U(%) Время, τ (сек)	0	5	10	20	30	40
	Разность температур, Δt (°K)					
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	0,05	0,04	0,03	0,18	0,11	0,00
60	0,73	0,60	0,48	1,21	0,95	0,39
90	1,21	1,15	1,11	1,44	1,24	1,04
95	1,28	1,23	1,25	1,43	1,22	1,08
100	1,37	1,30	1,48	1,40	1,20	1,07
110	1,50	1,41	1,72	1,35	1,15	1,02
120	1,60	1,53	1,77	1,29	1,09	0,97
150	1,88	1,81	1,66	1,09	0,92	0,77
180	2,10	2,00	1,51	0,94	0,82	0,63
210	2,26	1,94	1,35	0,86	0,75	0,57
240	2,30	1,78	1,23	0,81	0,70	0,52
270	2,14	1,66	1,16	0,78	0,67	0,49

Напряжение, подаваемое на нагревательный элемент, u (В)	Сопротивление нагревательного элемента, R (Ом)	Время действия нагревателя, τ_n (сек.)	Площадь нагревательного элемента, S (м ²)	Расстояние между пластиной и датчиком, x (м)	Теплоемкость нагревателя, C_n 10 ⁶ (Дж)\(м ³ ·К)
21	80	60	0,002	0,006	6,2

Вариант – 4

Влажность, U(%) Время, τ (сек)	0	2,5	5	10	15	20
	Разность температур, Δt (°K)					
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	0,06	0,04	0,03	0,20	0,12	0,00
60	0,78	0,64	0,51	1,31	1,02	0,42
90	1,31	1,24	1,20	1,55	1,33	1,12
95	1,38	1,33	1,35	1,54	1,32	1,16
100	1,47	1,40	1,59	1,51	1,29	1,15
110	1,62	1,52	1,86	1,45	1,23	1,10
120	1,73	1,65	1,90	1,39	1,17	1,04
150	2,02	1,95	1,78	1,18	0,99	0,83
180	2,26	2,16	1,62	1,01	0,88	0,68
210	2,43	2,09	1,46	0,93	0,81	0,61
240	2,48	1,92	1,33	0,87	0,75	0,56
270	2,31	1,79	1,25	0,84	0,72	0,52

Напряжение, подаваемое на нагревательный элемент, u (В)	Сопротивление нагревательного элемента, R (Ом)	Время действия нагревателя, τ_n (сек.)	Площадь нагревательного элемента, S (м ²)	Расстояние между пластиной и датчиком, x (м)	Теплоемкость нагревателя, C_n 10 ⁶ (Дж)\(м ³ ·К)
17	100	50	0,0022	0,005	5,5

Вариант – 5

Влажность, U(%) Время, τ (сек)	0	5	10	20	30	40
	Разность температур, Δt (°K)					
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	0,04	0,03	0,02	0,16	0,10	0,00
60	0,62	0,50	0,40	1,03	0,80	0,33
90	1,03	0,97	0,94	1,22	1,05	0,88
95	1,08	1,04	1,06	1,21	1,04	0,91
100	1,16	1,10	1,25	1,19	1,01	0,91
110	1,27	1,19	1,46	1,14	0,97	0,86
120	1,36	1,30	1,50	1,09	0,92	0,82
150	1,59	1,53	1,40	0,92	0,78	0,65
180	1,78	1,69	1,28	0,79	0,69	0,54
210	1,91	1,64	1,14	0,73	0,63	0,48
240	1,95	1,51	1,04	0,69	0,59	0,44
270	1,81	1,41	0,98	0,66	0,57	0,41

Напряжение, подаваемое на нагревательный элемент, u (В)	Сопротивление нагревательного элемента, R (Ом)	Время действия нагревателя, τ_n (сек.)	Площадь нагревательного элемента, S (м ²)	Расстояние между пластиной и датчиком, x (м)	Теплоемкость нагревателя, C_n 10 ⁶ (Дж)(м ³ ·К)
22	84	60	0,0028	0,006	5,6

Вариант – 6

Влажность, U(%) Время, τ (сек)	0	2,5	5	10	15	20
	Разность температур, Δt (°K)					
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	0,07	0,05	0,04	0,25	0,15	0,00
60	0,98	0,80	0,64	1,63	1,28	0,52
90	1,63	1,55	1,50	1,94	1,66	1,40
95	1,72	1,66	1,69	1,93	1,65	1,45
100	1,84	1,75	1,99	1,89	1,61	1,44
110	2,02	1,90	2,32	1,82	1,54	1,37
120	2,16	2,07	2,38	1,74	1,47	1,30
150	2,53	2,43	2,23	1,47	1,24	1,04
180	2,83	2,70	2,03	1,26	1,10	0,85
210	3,04	2,61	1,82	1,16	1,01	0,76
240	3,10	2,40	1,66	1,09	0,94	0,71
270	2,88	2,24	1,56	1,05	0,90	0,65

Напряжение, подаваемое на нагревательный элемент, u (В)	Сопротивление нагревательного элемента, R (Ом)	Время действия нагревателя, τ_n (сек.)	Площадь нагревательного элемента, S (м ²)	Расстояние между пластиной и датчиком, x (м)	Теплоемкость нагревателя, C_n 10 ⁶ (Дж)(м ³ ·К)
18	82	50	0,0025	0,006	5,7

Вариант – 7

Влажность, U(%) Время, τ (сек)	0	5	10	20	30	40
	Разность температур, Δt (°K)					
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	0,04	0,03	0,02	0,16	0,10	0,00
60	0,62	0,50	0,40	1,03	0,80	0,33
90	1,03	0,97	0,94	1,22	1,05	0,88
95	1,08	1,04	1,06	1,21	1,04	0,91
100	1,16	1,10	1,25	1,19	1,01	0,91
110	1,27	1,19	1,46	1,14	0,97	0,86
120	1,36	1,30	1,50	1,09	0,92	0,82
150	1,59	1,53	1,40	0,92	0,78	0,65
180	1,78	1,69	1,28	0,79	0,69	0,54
210	1,91	1,64	1,14	0,73	0,63	0,48
240	1,95	1,51	1,04	0,69	0,59	0,44
270	1,81	1,41	0,98	0,66	0,57	0,41

Напряжение, подаваемое на нагревательный элемент, u (В)	Сопротивление нагревательного элемента, R (Ом)	Время действия нагревателя, τ_n (сек.)	Площадь нагревательного элемента, S (м ²)	Расстояние между пластиной и датчиком, x (м)	Теплоемкость нагревателя, C_n 10 ⁶ (Дж)(м ³ ·К)
24	105	60	0,0014	0,005	6,3

Вариант – 8

Влажность, U(%)	0	2,5	5	10	15	20
	Разность температур, Δt (°K)					
Время, τ (сек)						
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	0,08	0,06	0,04	0,28	0,17	0,00
60	1,09	0,90	0,72	1,82	1,43	0,58
90	1,82	1,73	1,67	2,16	1,85	1,56
95	1,92	1,85	1,88	2,15	1,84	1,62
100	2,05	1,95	2,22	2,11	1,80	1,60
110	2,25	2,12	2,58	2,02	1,72	1,53
120	2,41	2,30	2,65	1,93	1,63	1,45
150	2,81	2,71	2,48	1,64	1,38	1,16
180	3,15	3,00	2,26	1,40	1,23	0,95
210	3,38	2,91	2,03	1,29	1,13	0,85
240	3,45	2,68	1,85	1,21	1,05	0,79
270	3,21	2,50	1,74	1,17	1,00	0,73

Напряжение, подаваемое на нагревательный элемент, u (В)	Сопротивление нагревательного элемента, R (Ом)	Время действия нагревателя, τ_n (сек.)	Площадь нагревательного элемента, S (м ²)	Расстояние между пластиной и датчиком, x (м)	Теплоемкость нагревателя, C_n 10 ⁶ (Дж)\(м ³ ·К)
19	94	50	0,0018	0,005	6,1

Вариант – 9

Влажность, U(%) Время, τ (сек)	0	5	10	20	30	40
	Разность температур, Δt (°K)					
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	0,08	0,06	0,04	0,28	0,17	0,00
60	1,12	0,92	0,73	1,87	1,46	0,60
90	1,87	1,77	1,71	2,22	1,90	1,60
95	1,97	1,90	1,93	2,20	1,88	1,66
100	2,10	2,00	2,27	2,16	1,84	1,65
110	2,31	2,17	2,65	2,08	1,76	1,57
120	2,47	2,36	2,72	1,98	1,68	1,49
150	2,89	2,78	2,55	1,68	1,42	1,19
180	3,23	3,08	2,32	1,44	1,26	0,98
210	3,47	2,98	2,08	1,32	1,15	0,87
240	3,54	2,74	1,89	1,25	1,08	0,81
270	3,29	2,56	1,78	1,20	1,03	0,75

Напряжение, подаваемое на нагреватель- ный элемент, u (В)	Сопротив- ление нагрева- тельного элемента, R (Ом)	Время действия нагрева- теля, τ_n (сек.)	Площадь нагрева- тельного элемента, S (м ²)	Расстояние между пла- стиной и датчиком, x (м)	Теплоемкость нагревателя, C_n 10 ⁶ (Дж)\(м ³ ·К)
22	82	60	0,0023	0,0054	5,9

Вариант – 10

Влажность, U(%) Время, τ (сек)	0	2,5	5	10	15	20
	Разность температур, Δt (°K)					
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	0,06	0,05	0,03	0,22	0,13	0,00
60	0,87	0,71	0,57	1,45	1,13	0,46
90	1,45	1,37	1,33	1,72	1,47	1,24
95	1,52	1,47	1,49	1,71	1,46	1,29
100	1,63	1,55	1,76	1,67	1,43	1,28
110	1,79	1,68	2,05	1,61	1,37	1,22
120	1,91	1,83	2,11	1,54	1,30	1,15
150	2,24	2,16	1,97	1,30	1,10	0,92
180	2,50	2,39	1,80	1,12	0,98	0,76
210	2,69	2,31	1,61	1,02	0,89	0,67
240	2,74	2,13	1,47	0,97	0,84	0,62
270	2,55	1,98	1,38	0,93	0,80	0,58

Напряжение, подаваемое на нагревательный элемент, u (В)	Сопротивление нагревательного элемента, R (Ом)	Время действия нагревателя, τ_n (сек.)	Площадь нагревательного элемента, S (м ²)	Расстояние между пластиной и датчиком, x (м)	Теплоемкость нагревателя, C_n 10 ⁶ (Дж)\(м ³ ·К)
20	86	50	0,002	0,0062	6,4

Вариант – 11

Влажность, U(%) Время, τ (сек)	0	2,5	5	10	15	20
	Разность температур, Δt (°K)					
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	0,09	0,06	0,04	0,31	0,19	0,00
60	1,20	0,99	0,79	2,01	1,57	0,64
90	2,01	1,90	1,84	2,39	2,04	1,72
95	2,11	2,04	2,07	2,37	2,03	1,78
100	2,26	2,15	2,44	2,32	1,98	1,77
110	2,48	2,33	2,85	2,23	1,90	1,69
120	2,65	2,54	2,92	2,13	1,80	1,60
150	3,10	2,99	2,74	1,81	1,52	1,28
180	3,47	3,31	2,49	1,55	1,36	1,05
210	3,73	3,21	2,24	1,42	1,24	0,94
240	3,81	2,95	2,04	1,34	1,16	0,87
270	3,54	2,75	1,91	1,29	1,11	0,80

Напряжение, подаваемое на нагревательный элемент, u (В)	Сопротивление нагревательного элемента, R (Ом)	Время действия нагревателя, τ_n (сек.)	Площадь нагревательного элемента, S (м ²)	Расстояние между пластиной и датчиком, x (м)	Теплоемкость нагревателя, C_n 10 ⁶ (Дж)\(м ³ ·К)
26	118	50	0,0018	0,0061	6,5

Вариант – 12

Влажность, U(%) Время, τ (сек)	0	5	10	20	30	40
	Разность температур, Δt (°K)					
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	0,09	0,07	0,04	0,31	0,19	0,00
60	1,23	1,01	0,81	2,05	1,61	0,66
90	2,05	1,95	1,88	2,44	2,09	1,76
95	2,16	2,09	2,12	2,42	2,07	1,83
100	2,31	2,20	2,50	2,38	2,03	1,81
110	2,54	2,39	2,92	2,28	1,94	1,73
120	2,71	2,60	2,99	2,18	1,84	1,64
150	3,17	3,06	2,80	1,85	1,56	1,31
180	3,56	3,39	2,55	1,58	1,39	1,07
210	3,82	3,28	2,29	1,45	1,27	0,96
240	3,89	3,02	2,08	1,37	1,19	0,89
270	3,62	2,82	1,96	1,32	1,13	0,82

Напряжение, подаваемое на нагревательный элемент, u (В)	Сопротивление нагревательного элемента, R (Ом)	Время действия нагревателя, τ_n (сек.)	Площадь нагревательного элемента, S (м ²)	Расстояние между пластиной и датчиком, x (м)	Теплоемкость нагревателя, C_n 10 ⁶ (Дж)\(м ³ ·К)
15	58	60	0,0024	0,005	5,4

Вариант – 13

Влажность, U(%) Время, τ (сек)	0	5	10	20	30	40
	Разность температур, Δt (°K)					
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	0,07	0,05	0,03	0,24	0,15	0,00
60	0,95	0,78	0,62	1,59	1,24	0,51
90	1,59	1,50	1,46	1,89	1,62	1,36
95	1,67	1,61	1,64	1,87	1,60	1,41
100	1,79	1,70	1,93	1,84	1,57	1,40
110	1,96	1,84	2,25	1,76	1,50	1,33
120	2,10	2,01	2,31	1,69	1,42	1,26
150	2,45	2,36	2,17	1,43	1,21	1,01
180	2,75	2,62	1,97	1,22	1,07	0,83
210	2,95	2,54	1,77	1,12	0,98	0,74
240	3,01	2,33	1,61	1,06	0,92	0,69
270	2,80	2,18	1,51	1,02	0,88	0,64

Напряжение, подаваемое на нагревательный элемент, u (В)	Сопротивление нагревательного элемента, R (Ом)	Время действия нагревателя, τ_n (сек.)	Площадь нагревательного элемента, S (м ²)	Расстояние между пластиной и датчиком, x (м)	Теплоемкость нагревателя, C_n 10 ⁶ (Дж)\(м ³ ·К)
18	70	60	0,0015	0,0055	6,1

Вариант – 14

Влажность, U(%) Время, τ (сек)	0	2,5	5	10	15	20
	Разность температур, Δt (°K)					
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	0,06	0,05	0,03	0,22	0,13	0,00
60	0,87	0,71	0,57	1,45	1,13	0,46
90	1,45	1,37	1,33	1,72	1,47	1,24
95	1,52	1,47	1,49	1,71	1,46	1,29
100	1,63	1,55	1,76	1,67	1,43	1,28
110	1,79	1,68	2,05	1,61	1,37	1,22
120	1,91	1,83	2,11	1,54	1,30	1,15
150	2,24	2,16	1,97	1,30	1,10	0,92
180	2,50	2,39	1,80	1,12	0,98	0,76
210	2,69	2,31	1,61	1,02	0,89	0,67
240	2,74	2,13	1,47	0,97	0,84	0,62
270	2,55	1,98	1,38	0,93	0,80	0,58

Напряжение, подаваемое на нагревательный элемент, u (В)	Сопротивление нагревательного элемента, R (Ом)	Время действия нагревателя, τ_n (сек.)	Площадь нагревательного элемента, S (м ²)	Расстояние между пластиной и датчиком, x (м)	Теплоемкость нагревателя, C_n 10 ⁶ (Дж)\(м ³ ·К)
21	105	50	0,002	0,005	6,7

Вариант – 15

Влажность, U(%) Время, τ (сек)	0	5	10	20	30	40
	Разность температур, Δt (°K)					
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	0,05	0,04	0,03	0,18	0,11	0,00
60	0,73	0,60	0,48	1,21	0,95	0,39
90	1,21	1,15	1,11	1,44	1,24	1,04
95	1,28	1,23	1,25	1,43	1,22	1,08
100	1,37	1,30	1,48	1,40	1,20	1,07
110	1,50	1,41	1,72	1,35	1,15	1,02
120	1,60	1,53	1,77	1,29	1,09	0,97
150	1,88	1,81	1,66	1,09	0,92	0,77
180	2,10	2,00	1,51	0,94	0,82	0,63
210	2,26	1,94	1,35	0,86	0,75	0,57
240	2,30	1,78	1,23	0,81	0,70	0,52
270	2,14	1,66	1,16	0,78	0,67	0,49

Напряжение, подаваемое на нагреватель- ный элемент, u (В)	Спротив- ление нагрева- тельного элемента, R (Ом)	Время действия нагрева- теля, τ_n (сек.)	Площадь нагрева- тельного элемента, S (м ²)	Расстояние между пла- стиной и датчиком, x (м)	Теплоемкость нагревателя, C_n 10 ⁶ (Дж)\(м ³ ·К)
25	110	50	0,0018	0,0061	6,0

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. <https://www.webpoliteh.ru/lekcija-3-processy-perenosa-teploty/>
2. Болотов А.Г. Автоматизированная система исследования теплофизических характеристик почв / А.Г. Болотов, С.В. Макарычев, А.А. Лёвин // Вестник АГАУ. Барнаул, 2002. № 3.
3. Макарычев С. В. Теплофизика почв: методы и свойства / С.В. Макарычев, М.А. Мазиров. – Суздаль, 1996. Том 1. – 232 с.
4. Шейн Е.В. Курс физики почв / Е.В. Шейн. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 432 с.