БУ ВО Ханты-Мансийского автономного округа – Югры

«СУРГУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

Кафедра экспериментальной физики

Бондарев Александр Владимирович

**Моделирование геотермических исследований**

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

По направлению Физика

Профиль Геофизика

Научный руководитель:

доцент

Шадрин Г.А. \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Допущено к защите:

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2022 г.

Зав. Кафедрой

д.физ.н., профессор

Ельников А.В.\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Сургут 2022

**Содержание**

[**ВВЕДЕНИЕ 2**](#_Toc103940393)

[**ГЛАВА 1. 4**](#_Toc103940394)

[**1.1. Тепловое поле Земли 4**](#_Toc103940395)

[**1.2. Виды теплопередачи 8**](#_Toc103940396)

[**1.2.1. Кондуктивная передача тепла 9**](#_Toc103940398)

[**1.2.2. Конвективный теплоперенос 14**](#_Toc103940400)

[**1.2.3. Перенос тепла излучением 17**](#_Toc103940402)

[**1.3. Механизмы теплопроводности 18**](#_Toc103940403)

[**1.4. Тепловые свойства горных пород 15**](#_Toc103940404)

[**1.5. Теплопередача 21**](#_Toc103940405)

[**ГЛАВА 2. 27**](#_Toc103940406)

[**2.1. Методы и аппаратура, применяемые для геотермических исследований 28**](#_Toc103940407)

[**2.2. Принципы теории терморазведки 37**](#_Toc103940408)

[**2.3. Данные, получаемые из термограмм скважин 39**](#_Toc103940407)

[**2.4. Достоверность геотермических данных 43**](#_Toc103940407)

[**ГЛАВА 3. 44**](#_Toc103940409)

[**3.1. Описание экспериментальной установки и принцип её работы 44**](#_Toc103940410)

[**3.2. Методика проведения измерений 45**](#_Toc103940411)

[**3.3. Анализ экспериментальных данных 60**](#_Toc103940410)

[**ЗАКЛЮЧЕНИЕ 61**](#_Toc103940412)

[**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 62**](#_Toc103940413)

**введение**

Геотермические исследования объединяют в себе множество методов исследования теплового поля земли. Они применяются для поиска геотермальных источников энергии и залежей полезных ископаемых, исследования экологии регионов, контроля качества, технического состояния и условий работы месторождений углеводородов. Рассмотренный в данной работе метод называется термометрия скважин. Этот метод является неотъемлемой частью геофизических методов исследования скважин и используется для изучения распределения температуры в геологическом разрезе, вскрытом скважиной, и определения геотермического градиента, исследования технического состояния скважин, контроля качества цементирования скважин, оценки условий работы буровых инструментов и приборов геофизических исследований скважин. В мире существует большое количество залежей трудноизвлекаемых запасов нефти и газа, а также месторождений, находящихся на III и IV стадиях разработки, при которых добыча нефти крайне низкая. На сегодняшний день существует несколько методов решения этой проблемы, одними из которых являются тепловые методы увеличения нефтеотдачи. Такие методы, как внутрипластовое горение или паротепловое воздействие на пласт не могут обойтись без измерения и контроля температуры в пласте, а для недавно разработанного перспективного метода разогрева нефтяного пласта электромагнитным излучением СВЧ-диапазона термометрия необходима.

**ГЛАВА 1.**

**1.1. Тепловое поле Земли**

На тепловое поле земли влияют внутренние и внешние процессы. К внешним источником относится солнечная радиация, попадающая на Землю, при этом глубина проникновения ее суточных колебаний составляет примерно 0,9-1,2 метра, то есть она распространяется только на почву и подпочвенный слой, а глубина проникновения сезонных колебаний равна примерно 15-30 метров. Сезонные колебания в зависимости от типа горных пород, их проницаемости и широты местности могут достигать глубины до 50 метров, а иногда и больше. Сезонные колебания температуры Земли значительно меньше в зоне развития многолетнемерзлых пород. Начиная с некоторой глубины так называемого нейтрального слоя держится постоянная температура, зависящая только от широты местности. В средних широтах температура нейтрального слоя составляет примерно от +6 до +12 °C. Однако это значение существенно зависит от особенностей геологического строения каждого отдельной взятой зоны земной коры. Ниже нейтрального слоя температура не зависит от ее колебаний на поверхности под влиянием внешних факторов.

Через каждые 100 метров вглубь земной коры температура увеличивается примерно на 3 °C. Этот рост температуры обуславливается существованием внутренних источников тепла в горных породах. К ним относятся распад долгоживущих радиоактивных изотопов, гравитационную дифференциацию вещества, приливное трение, метаморфизм и фазовые переходы. Главным источником внутреннего тепла большинство ученых считают распад радиоактивных элементов U, Th, K. Но по мнению других специалистов, основную роль играет гравитационная дифференциация вещества. Так же это объясняется наличием регионального теплового потока от источников внутреннего тепла Земли, поднимающегося к поверхности. Его величину принято характеризовать плотностью теплового потока (или просто тепловым потоком). Среднее значение теплового потока как на суше, так и в океанах одинаково и составляет 0,06 Вт/м2, отклоняясь от него не более чем в 5 - 7 раз. Постоянство средних тепловых потоков суши и океанов при резком изменении мощностей и строения земной коры свидетельствует о различии в тепловом строении верхней мантии. Поэтому аномалии тепловых потоков, то есть отклонения от установленных средних потоков, несут информацию о строении как земной коры, так и верхней мантии.

Источники локальных тепловых потоков, вызывающих аномалии температур, разнообразны: наличие многолетнемерзлотных пород, то есть мощных (до сотен метров) толщ с отрицательными температурами; присутствие пород и руд с повышенной радиоактивностью; влияние экзотермических (с поглощением тепла) и эндотермических (с выделением тепла) процессов, происходящих в нефтегазоносных горизонтах, залежах угля, сульфидных и других рудах; проявление современного вулканизма и тектонических движений; циркуляция подземных, в том числе термальных, вод и др. Роль каждого из этих факторов определяется геологогидрогеологическим строением. Локальные тепловые потоки, как и региональные, зависят не только от наличия источников, но и от условий переноса тепла за счет теплопроводности горных пород и конвекции почвенного воздуха и подземных вод.

В гелиотермозоне температура горных пород в течение года может варьировать иногда в широком диапазоне. Амплитуда ее сезонных колебаний изменяется по величине и фазе на разной глубине горных пород в зависимости от их теплопроводности и проницаемости и быстро уменьшается с глубиной. Характер сезонных колебаний температуры в приповерхностной части геологического разреза зависит от широты местности, климатической зоны, наличия водоупоров и др. (рис. 1.1.1).

В средних широтах температура на земной поверхности колеблется примерно от –30 °С зимой до +30 °С летом. При этом амплитуда колебания от зимы к лету, распространяясь ниже, постепенно затухает до так называемого нейтрального слоя – глубины, на которой температура остается неизменной в течение всего года (рис. 1.1.2).

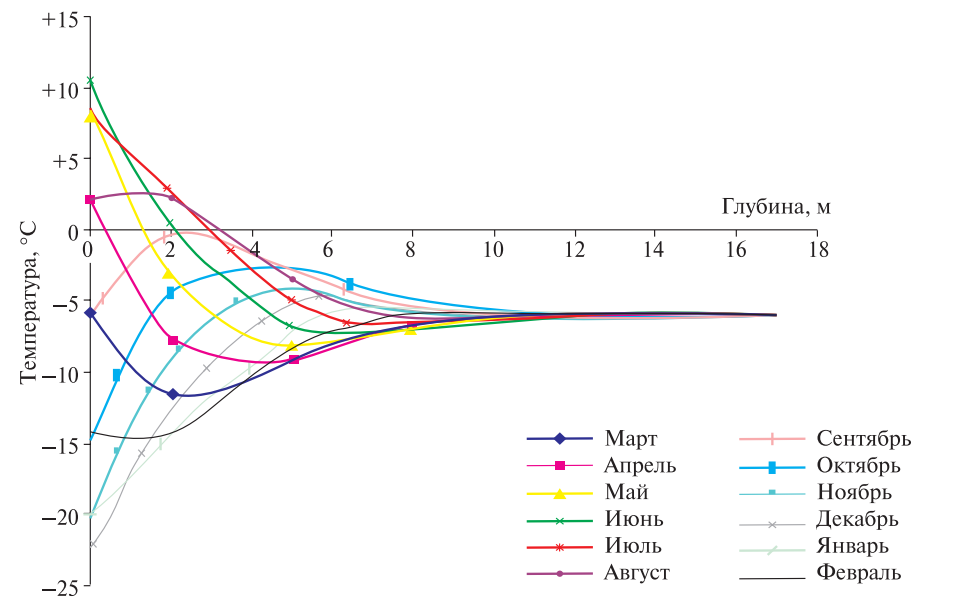
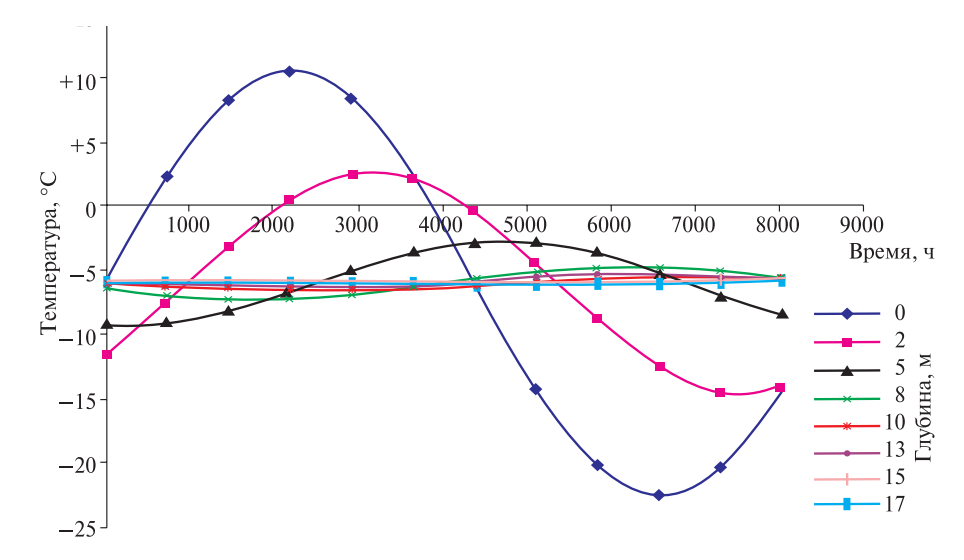


Рис. 1.1.2. Термограммы в гелиотермозоне в течение года на глубине проникновения от 0 до 17 м температурной волны в горные породы

Рис. 1.1.1. Пример сезонного изменения температуры во времени

Поэтому при регистрации термограммы форма кривой в пределах гелиотермозоны будет зависеть от сезона года, в течение которого выполнялись скважинные измерения. А ниже ее будет наблюдаться монотонное увеличение температуры с глубиной. Основная потеря внутреннего тепла Земли (4·1012 Вт) происходит за счет теплового потока, а меньшую роль играют вулканизм, землетрясения, гидротермальные источники. Плотность теплового потока из недр определяет энергетическое состояние поверхности Земли и тектонические особенности региона. Эта величина различна и в среднем составляет (мВт/м2): для глубоководных океанических впадин - 28-65, в пределах щитов - 29-49, в геосинклинальных областях и срединно-океанических хребтах - 100-300 и более. Среднее значение для Земли равно 64-75 мВт/м2, что в несколько десятков тысяч раз меньше потока лучистой энергии Солнца.

Следует знать, что глубина до слоя, в котором в течение года температура не изменяется верна только для используемой чувствительности скважинных термометров. Если их чувствительность увеличится на порядок, то глубину распространения гелиотермозоны также нужно будет пересматривать. Для определения температуры в слоях, находящихся ниже нейтрального слоя Земли и их теплопотерь, инсоляционные процессы не имеют значения. Можно допустить, что в исторических масштабах времени температура оставалась постоянной, а в геологических – менялась не более чем на 50 °С. Скорость нарастания температуры с глубиной в геотермозоне (рис. 1.1.3) определяется такими факторами, как: теплопроводность слоев горных пород, проницаемость горных пород, выделение тепловой энергии при распаде радиоактивных элементов, находящихся в горных породах и т. д.

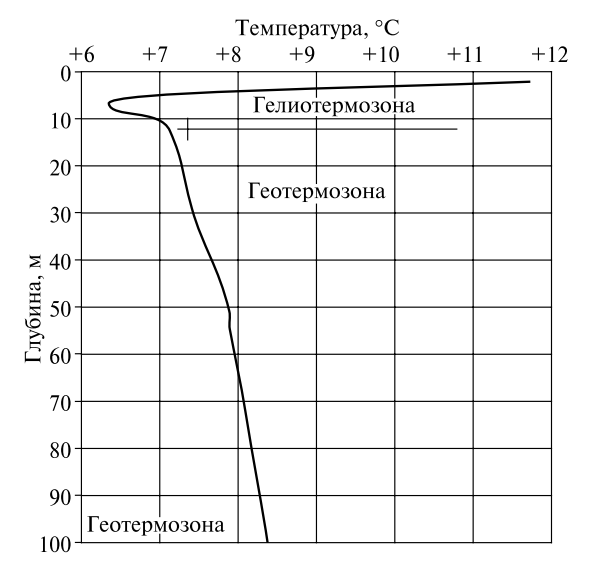
Результаты геотермических исследований применяются как для определения закономерностей распределения температурного поля, так и особенностей рассматриваемой территории: обнаружения или оконтуривания месторождений полезных ископаемых, выделения областей питания и разгрузки подземных вод и т. д. Сведения о тепловых свойствах горных пород и их температуре важны для использования термических методов извлечения нефти, оттаивания и замораживания пород при проходке шахтных стволов в обводненных породах и т. д.

Рис. 1.1.3. Выделение гелиотермозоны и геотермозоны на термограмме скважины Булавки-41 (Оршанская впадина)

**1.2.** **Виды теплопередачи**

По представлениям современных ученых после образования Земля была холодным телом. После образования Земли распад радиоактивных элементов постепенно выделял тепло и разогревал ее. Но, также, результатом излучения тепла с поверхности в околоземное пространство происходило и ее охлаждение. Образовались земная кора и относительно холодная литосфера. Ниже нейтрального слоя наблюдается высокая температура и ее рост можно наблюдать непосредственно в глубоких шахтах и буровых скважинах, а также при извержении вулканов. При извержении вулканов лава имеет температуру +1200 ... +1300 °C. Внутреннюю энергию Земли можно разложить на составляющие (рис. 1.2.1). Некоторая часть расходуется на совершение такой работы, как: перемещение литосферных плит, а другая другая – теплообмен – идет на передачу тепла теплопроводностью, конвекцией и тепловым излучением. Теплопередача (или теплообмен) – один из способов изменения внутренней энергии тела (или системы тел), при этом внутренняя энергия одного тела переходит во внутреннюю энергию другого, причем, без совершения механической работы.

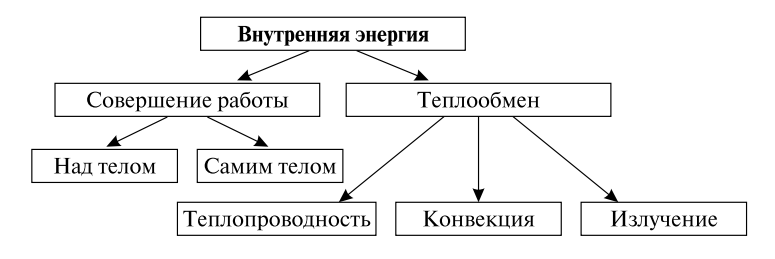
Между двумя средами теплообмен происходит через разделяющую их твердую поверхность или границу раздела между ними. Тепло способно переходить только от более нагретого тела к менее нагретому. Процесс теплообмена всегда протекает так, что уменьшение внутренней энергии одного тела всегда сопровождается увеличением внутренней энергии другого тела, участвующего в процессе теплообмена. Это есть частный случай закона сохранения энергии. Так как оболочки Земли имеют различную температуру, фазовое состояние и химический состав, в горных порода Земли существует несколько видов теплопередачи.

Рис. 1.2.1. Составляющие внутренней энергии в горных породах

**1.2.1. Кондуктивная передача тепла**

Явление теплопроводности заключается в том, что кинетическая энергия атомов и молекул, определяющая температуру тела, передается другому телу при их взаимодействии или из более нагретых частей тела к менее нагретым. При этом процессе в любом теле или горной породе в направлении оси x возникает тепловой поток qx (рис. 1.2.2). Физический механизм передачи энергии есть взаимодействие частиц с разным запасом энергии (разной температурой), в результате которого происходит выравнивание их энергий (температур).

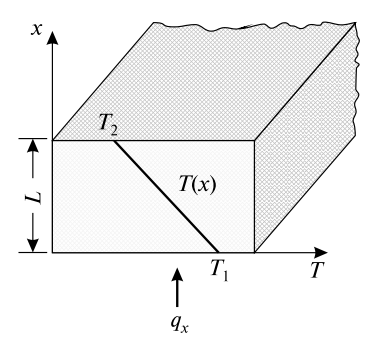
Согласно закону Фурье, количество теплоты dqτ (Дж), проходящее через элемент изотермической поверхности dF за промежуток времени dτ, пропорционально градиенту температур dT/dx, а поток тепла dqτ=−λ(dT/dx)dFdτ, где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К), есть физическое свойство вещества.

Рис. 1.2.2. Кондуктивная передача тепла: Т – температура тела; qx – тепловой поток; L – длина рассматриваемого интервала

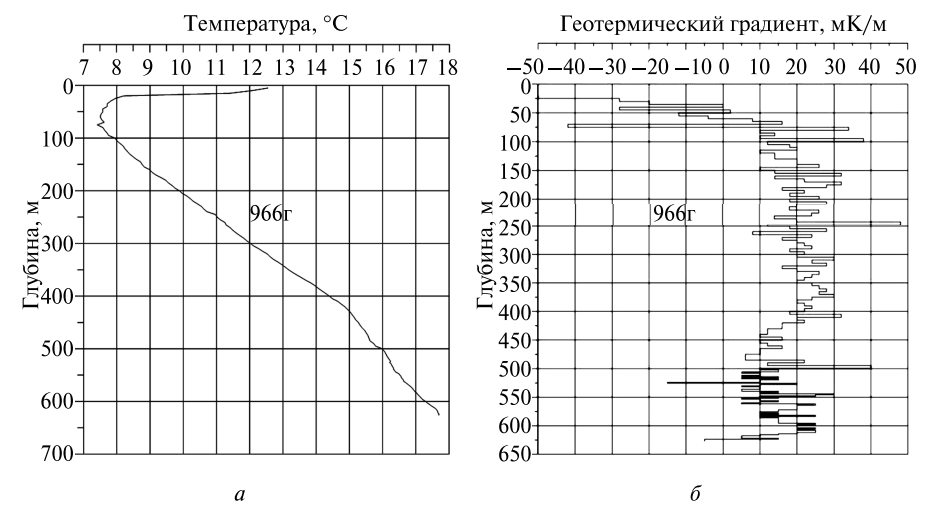
На практике при регистрации термограмм в скважинах в большинстве случаев замечают проявление кондуктивной передачи тепла, скорость изменения с глубиной которой влияет на кривую геотермического градиента. На рис. 1.2.3 показана термограмма и кривая геотермического градиента по скважине 966г, которая расположена в окрестностях г. Солигорска, Припятский прогиб. В верхней части геологического разреза (в зоне активного водообмена) происходит монотонное возрастание температуры и геотермического градиента с глубиной. Водоупором, залегающим ниже зоны пресных вод, является глинистомергельная толща. Она отражается практически прямой линией на термограмме. В этом интервале глубины значения геотермического градиента составляют приблизительно 20 мК/м в зависимости от наличия пропластков разного литологического ­состава. Ниже глинисто-мергельной толщи залегают отложения каменной соли, которая содержит пропластки терригенного материала.

Рис. 1.2.3. Термограмма (а) и геотермический градиент (б) по скважине 966г, северо-западная часть Припятского прогиба

Геотермической градиент в слое высокотеплопроводных эвапоритов снижается до средних значений 15 мК/м. Его отклонения в ту или иную сторону в данном случае может свидетельствовать о степени загрязнения пластов соли терригенным материалом с меньшей теплопроводностью. Коэффициент теплопроводности λ численно равен количеству тепла, прошедшего через единицу площади за единицу времени при градиенте температуры, равном единице (площадка dS, через которую происходит передача тепла, перпендикулярна его распространению по оси x). В СИ размерность коэффициента теплопроводности обозначается Вт/(м ⋅ К), но часто используют размерности Вт/(см ⋅ К), а в публикациях до 1990 г. – в старой системе единиц – кал/(см ⋅ с ⋅ К). Коэффициент теплопроводности зависит от температуры. Пример этой зависимости для разных материалов показан на рис. 1.2.4. Анизотропия сил связи в кристаллах приводит к анизотропии коэффициента теплопроводности. Это иллюстрирует пример монокристалла кварца (рис. 1.2.5) как минерала, входящего в состав ряда типов горных пород. В табл. 1.2.1 приведены данные о коэффициенте теплопроводности по направлению, параллельному оси с, и по перпендикулярному к этой оси направлению.

*Таблица 1.2.1*

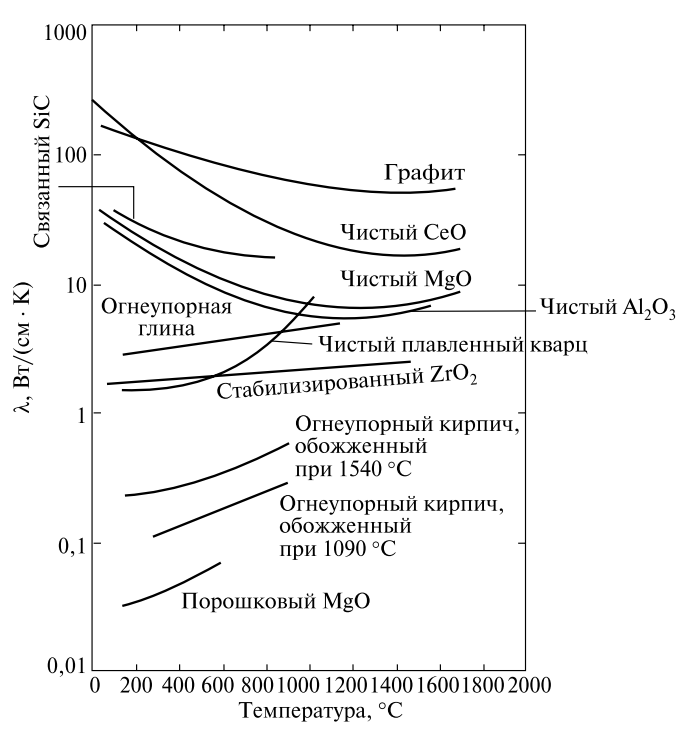
**Теплопроводность кристалла кварца (λ Вт/м · К) по различным направлениям**

Рис. 1.2.4. Изменение теплопроводности отдельных материалов в широком диапазоне изменения температуры

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Направление | Температура, °С | | | |
| +100 | 0 | –78 | –100 |
| Параллельно оси с | 3,223 | 4,898 | 7,032 | 17,623 |
| Перпендикулярно оси с | 2,009 | 2,595 | 3,642 | 8,832 |

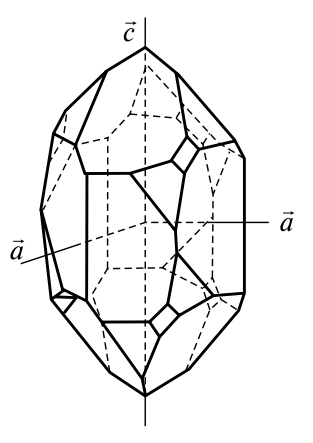
Из данных табл. 1.2.1 видно, что коэффициент теплопроводности кварца вдоль гексагональной оси с почти вдвое выше соответствующих значений в направлениях, перпендикулярных оси с, т. е. в направлениях, лежащих в базисной плоскости кристалла. Со снижением температуры коэффициент теплопроводности возрастает. Тепловые свойства минералов зависят от химического состава кристаллов и кристаллографических направлений. У кристалла кварца значения главных осевых теплопроводностей монокристалла составляют λc = 10,8 Вт/(м · К); λa, λb = 6,1 Вт/(м · К). Также они зависят от того, в каком направлении вырезан испытуемый образец из кристалла кварца: перпендикулярно, параллельно или под углом к его главной оси (см. рис. 1.2.5 и табл. 1.2.1).

Рис. 1.2.5. Изображение кристалла кварца и направления в нем осей

Коэффициент теплопроводности для кварца зависит как от температуры, так и от его физического состояния. Для плавленого кварца он значительно ниже и приближается к таковому для стекол в то время, как для монокристалла кварца он на 1–1,5 порядка выше (рис. 1.2.6).

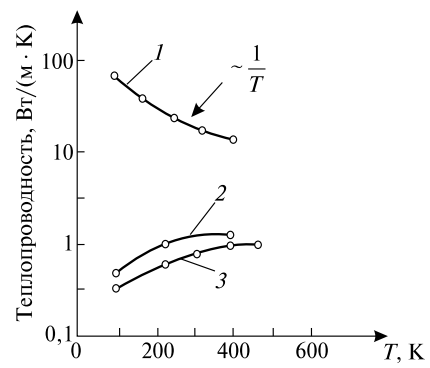
Все вышесказанное относится к решеточной (фононной) части теплоемкости твердого тела, свойственной неметаллическим кристаллам. В металлах в переносе тепла, кроме атомов кристаллической решетки, участвуют еще и свободные электроны, которые также являются и носителями электрического заряда, обеспечивая высокую электропроводность металлов. В чистых металлах основные носители тепла – это свободные электроны, а не фононы. При достаточно высоких температурах металлов решеточная компонента составляет всего 1–2 % от электронной теплопроводности. Этим объясняется высокая теплопроводность чистых металлов в сравнении с диэлектриками. Например, у алюминия в стандартных условиях коэффициент теплопроводности λ = 226 Вт/(м ⋅ К), что примерно на два порядка больше, чем у кварца.

Рис. 1.2.6. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности: 1 – монокристалла кварца; 2 – плавленого кварца; 3 – стекла пирекс

**1.2.2. Конвективный теплоперенос**

Конвекция представляет собой процесс переноса энергии в форме теплоты при перемещении объемов жидкости или газа (текучей среды) в пористых либо трещиноватых горных породах, а также при вязко-пластичном течении вещества в разогретой мантии из области с одной температурой в область с другой температурой. При этом перенос теплоты неразрывно связан с переносом самой среды. Конвекция возможна только в текучей (фильтрующейся) среде. Конвективный теплообмен применительно к горным породам является передачей энергии в форме теплоты в неравномерно нагретой жидкой либо газообразной среде, который обусловлен конвективным движением этой среды и ее теплопроводностью и осуществляющийся за счет движения среды. Он определяется совместным действием двух механизмов переноса тепла – конвективного переноса и теплопроводности. Из этого следует, что в случае конвективного теплопереноса распространение тепла в пространстве осуществляется за счет переноса тепла при перемещении текучей среды (фильтрации подземных вод, нефти и газа) в пористой или трещиноватой горной породе из области с более высокой температурой в область с менее высокой температурой, а также за счет теплового движения микрочастиц и обмена кинетической энергией между ними.

**1.2.3. Перенос тепла излучением**

Тепловое излучение представляет собой электромагнитное излучение с непрерывным спектром, испускаемое нагретыми телами за счет их тепловой энергии. Например, тепло и свет от лампы накаливания. Известны различные виды излучения. Тепловое излучение представляет собой излучение нагретых тел и определяется только температурой и свойствами этих тел. Для того, чтобы атом начал излучать электромагнитные волны или фотоны, ему необходимо сообщить определенное количество энергии в виде тепла или фотонов света. В процессе излучения атом теряет эту энергию: она переходит в энергию электромагнитных волн. Для непрерывного излучения необходим приток энергии извне. При тепловом излучении потеря энергии компенсируется за счет энергии теплового движения атомов или молекул, т. е. внутренней энергии вещества. Здесь имеет место постоянный переход внутренней энергии в энергию возбуждения атомов, затем энергия возбуждения преобразуется в энергию электромагнитных волн или фотонов (энергию излучения). Чем выше температура, тем больше энергия теплового движения частиц и больше энергия излучения. Согласно закону Стефана – Больцмана энергия излучения абсолютно черного тела пропорциональна абсолютной температуре в четвертой степени. очевидно, что роль теплообмена излучением в процессах переноса теплоты возрастает с увеличением температуры тела или среды. Излучение характеризуется длиной волны λ или частотой ν, причем эти две характеристики связаны зависимостью λν = с, где с – скорость света. В природе и технике элементарные процессы распространения теплоты (теплопроводность, конвекция и тепловое излучение) часто происходят совместно. Теплопроводность в чистом виде по большей части имеет место только в твердых телах. Конвекция всегда сопровождается теплопроводностью, так как покоящиеся флюиды также обладают коэффициентом теплопроводности. Совместный процесс переноса теплоты конвекцией и теплопроводностью называют конвективным теплообменом. Процессы теплопроводности и конвективного теплообмена могут сопровождаться теплообменом излучения. Теплообмен, обусловленный совместным переносом теплоты излучением и теплопроводностью, называется радиационно-кондуктивным теплообменом.

**1.3. Механизмы теплопроводности**

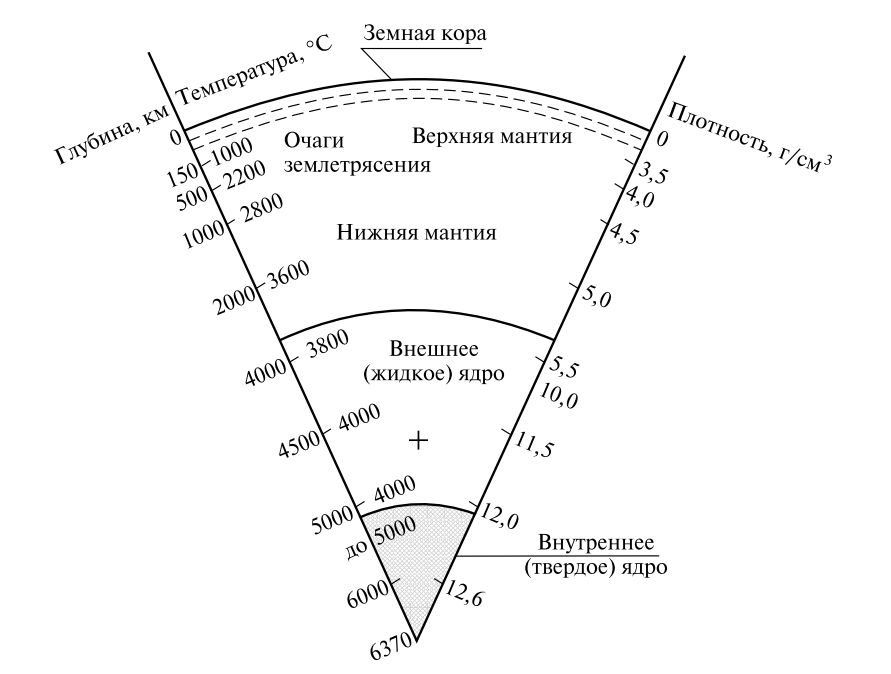
По представлениям современных ученых внутреннее строение Земли неоднородно. Так как земля неоднородна, сейсмические волны отражаются и распространяются с разной скоростью и непрямолинейно. Резкое изменение скорости сейсмических волн на глубинах около 60 и 2900 км позволило сделать вывод о скачкообразном увеличении плотности вещества Земли и выделить три ее части – литосферу, мантию и ядро. Так, на глубине около 60 км скорость волн увеличивается с 5 до 8 км/с. На глубине 2900 км 28 она возрастает до 13 км/с, затем вновь падает до 8 км/с. Ближе к центру Земли фиксируют возрастание скорости продольных волн до 11 км/с. Поперечные сейсмические волны проникают до глубины приблизительно 4000 км и затухают, что свидетельствует о том, что ядро Земли также неоднородно по плотности: внешняя его часть жидкая, а внутренняя является твердым телм (рис. 1.3.1). Температура в центре ядра по разным оценкам достигает около 6000–6200 °С. Это вызывает распространение тепла от внутренних оболочек планеты к поверхности. Так как земное ядро, составляющее 32 % от массы планеты и залегающее под мантией на глубине около 2891 км, недоступно к непосредственному изучению. Его состав достоверно неизвестен, но он может быть оценен по косвенным данным. Скорее всего, наиболее близкими веществу ядра могут быть железные метеориты – фрагменты ядер астероидов и протопланет. По данным сейсмических исследований, был оценен размер ядра (3485 км). Так как плотность ядра приблизительно на 5–10 % меньше, чем плотность сплавов «железо – никель», то ученые предполагают, что оно содержит больше легких элементов, чем железные метеориты. Среди вероятных элементов – Fe, Ni, FeO/FeS.

Рис. 1.3.1. Внутреннее строение Земли

В ядре может существовать металлическая проводимость, для которой выполняется закон Видемана – Франца. Этот физический закон утверждает, что для металлов отношение коэффициента теплопроводности (или тензоратеплопроводности) K к удельной электрической проводимости (или тензору проводимости) σ пропорционально температуре

На основании экспериментальных данных было установлено, что для различных металлов при одинаковой температуре отношение K/σ практически не изменяется. Закон Видемана – Франца о прямой пропорциональности между теплопроводностью (K) и электропроводностью (S) записывают в виде

где b – постоянная Больцмана; е – заряд электрона; Т – температура; В – постоянная, равная 2,5 для полупроводников и 3 – для металлов. Постоянная Больцмана, равная 1,381 · 10–23 Дж/К, представляет собой отношение универсальной газовой постоянной к числу Авогадро. Оно указывает на взаимосвязь между кинетической энергией частицы газа (атома или молекулы) и ее абсолютной температурой. Универсальная газовая постоянная численно равна работе расширения одного моля идеального газа в изобарном процессе при увеличении температуры на 1 К. Обозначается латинской буквой R, которая входит в уравнение состояния идеального газа:

В СИ универсальная газовая постоянная равна 8,31441 Дж/К · моль. Число Авогадро – физическая константа, численно равная количеству специфицированных структурных единиц (атомов, молекул, ионов, электронов или любых других частиц) в 1 моле вещества. Определяется как количество атомов в 12 г чистого изотопа 12C. Обозначается как NA. Значение числа Авогадро на начало 2011 г. – NA = 6,02214078(18) · 1023 моль–1. Исходя из закона Видемана – Франца теплопроводность ядра Земли можно вычислить по данным об его электропроводности. Для силикатной же оболочки Земли нельзя применить закон Видемана – Франца, здесь же теплопроводность уже зависит от температуры, давления и химического состава. Основную роль для горных пород в передаче тепла играет решеточная часть теплопроводности. В твердых телах невозможна конвекция (передача тепла потоками нагретого вещества), поэтому перенос тепла осуществляется только за счет колебаний кристаллической решетки или с точки зрения квантовой теории – за счет движения фононов. Если при данной температуре T один из узлов колеблется с амплитудой u, большей среднего значения uср, то он, связанный с соседними узлами силой межатомного взаимодействия, воздействует на них, вызывая рост амплитуды колебаний соседних частиц. Таким образом энергия передается от одного узла решетки к другому. Если концы твердого тела поддерживать при разных температурах, то в нем возникает непрерывный поток тепла. В теории введено понятие дебаевской температуры (ТD), которая разделяет интервалы высокотемпературного поведения параметров от низкотемпературного. По П. Дебаю, в кристаллах конечных размеров существует также еще и конечное число нормальных колебаний. Энергия каждого нормального колебания произвольной быть не может, она должна определяться целым числом квантов, или фононов. Процесс теплопередачи рассматривают как обмен энергиями в «фононном газе», при этом теплопроводность пропорциональна длине свободного пробега фононов и их скорости. В реальных кристаллах фононы рассеиваются посредством различных механизмов. При высоких температурах рассеивание происходит на другом фононе. Теоретический анализ позволяет сделать вывод, что при достаточно высоких температурах средняя длина свободного пробега фонона обратно пропорциональна абсолютной температуре. Поэтому коэффициент теплопроводности твердых тел при температурах выше характеристической (T > TD) обратно пропорционален абсолютной температуре. Фононный газ в определенном интервале температур ведет себя как идеальный газ, а так как фононы являются основными переносчиками тепла в твердом теле (это утверждение справедливо только для диэлектриков), то коэффициент теплопроводности твердого тела можно выразить такой же зависимостью, как и коэффициент теплопроводности идеального газа:

где С′ – теплоемкость единицы объема фононного газа;⟨ *l*ф⟩ – средняя длина свободного пробега фонона; *v*зв – скорость распространения звука в данном теле. Для горных пород ТD составляет +900 ... +600 °С. Температура порядка +600 °С достигается в Земле только на глубинах 30–50 км и ниже. Следовательно, изменение поведения фононной теплопроводности в зависимости от температуры приурочено к самому верхнему слою земной коры. При высоких температурах (T >> TD) теплопроводность пропорциональна (1/Т). С понижением температуры (T < TD) она возрастает, достигая максимума, после чего падает в соответствии с законом (Т3) в области очень низких температур, не характерных для Земли. Зависимость изменения теплопроводности от температуры земных недр была показана на рис. 1.2.4. На фононную теплопроводность влияет температура. Из этого следует, что в верхних слоях решеточная теплопроводность должна падать с глубиной. В глубоких слоях теплопроводность должна возрастать из-за превалирования эффекта давления. Описание этого механизма сделано для бездефектных кристаллов. Различные дефекты, а также границы в поликристаллических телах будут служить дополнительными источниками рассеяния фононов, что приводит к уменьшению теплопроводности. При высоких температурах определяющим служит рассеяние фононов процессами переброса. В заключение рассуждений о решеточной теплопроводности приведем эмпирически полученные соотношения для базальтов, связывающие теплопроводность и температуру:

и

При высоких температурах в недрах Земли (больше +1200 °C) становятся существенными два других механизма теплопередачи: радиационный и экситонный. Радиационная теплопроводность пренебрежимо мала на глубинах до 100–200 км и сравнима с фононной теплопроводностью на больших глубинах, превосходя ее в верхней мантии, но убывет в нижней мантии из-за роста поглощения излучения веществом. Экситонная теплопроводность (по термину «экситон» – квант возбуждения) также пренебрежимо мала при невысоких температурах, т. е. в литосфере. На глубинах более 500 км экситонная составляющая даже превышает радиационную и возрастает с глубиной. Для изучения теплового потока и в других практических геологических задачах наибольший интерес представляет фононная теплопроводность пород. Два же других вида теплопроводности важны при изучении термической истории Земли как планеты.

**1.4. Тепловые свойства горных пород**

На поверхности Земли в результате действия различных экзогенных процессов (процессов внешней динамики) образуются осадочные породы (осадки), которые в дальнейшем уплотняются, претерпевают физико-химические изменения – диагенез – и превращаются в осадочные горные породы, тонким слоем покрывающие до 75 % поверхности континентов. Как правило садки накапливаются в водной среде и значительно реже – в воздушной среде. Осадки состоят из таких материалов, как: обломки разрушенных на суше пород минералов различного генезиса; твердые части погибших растений, животных и продуктов их жизнедеятельности; химические осадки, которые образуются непосредственно из растворов; вулканические обломочные образования.

В соответствии с этим выделяют четыре группы осадочных пород:

* обломочные;
* химические (хемогенные);
* органогенные;
* пирокластические.

Тепловые свойства (коэффициенты теплопроводности, удельной теплоемкости и температуропроводности) для ряда осадочных, магматических, метаморфических пород и руд приведены в табл. 1.4.1.

*Таблица 1.4.1*

**Тепловые свойства отдельных видов горных пород и руд**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Первичный осадок или порода | | Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К) | | Удельная теплоемкость, кДж/(кг · К) | | Коэффициент температуропроводности, м2 /с |
| Осадки и образовавшиеся из них осадочные, метаморфические породы и руды | | | | | | |
| Брекчия | | 0,9–3,3 | – | | | – |
| Конгломерат | | 1,0–5,0 | 0,7–0,85 | | | 6,3–11,5 |
| Гравий сухой | | 0,4 | – | | | – |
| Песчаный ил | | 1,0–1,8 | 1,0–2,1 | | | – |
| Песок:  Сухой  Влажный  Нефтенасыщенный | | 0,7–6,5  1,1–7,4  0,8–4,2 | –  –  – | | | –  –  – |
| Кварцит | | 2,6–7,6 | 0,7–1,3 | | | 13,6–20,9 |
| Алеврито-глинистый ил | | 0,98–1,1 | 2,4–2,5 | | | – |
| Алевролит | | 0,4–3,8 | 0,8–1,7 | | | 5,4–15,4 |
| Глинистый ил | | 0,7–0,9 | – | | | – |
| Глина:  сухая  влажная | | 0,1–0,2  0,4–3,0 | –  0,8–3,6 | | | –  2,5–11,5 |
| Аргиллит | | 0,2–3,0 | 0,7–1,0 | | | 5,9–15,3 |
| Глинистый сланец | | 0,2–3,0 | 0,7–1,0 | | | 5,9–15,3 |
| Филлит | | 2,9 | – | | | – |
| Аспидный сланец | | 2,5 | – | | | – |
| Триполит (диатомит, диатомитовый трепел) сухой/влажный | | 0,5–2,0 | – | | | – |
| Глобигериновый ил | | 0,9–1,1 | – | | | – |
| Мел | | 0,8–2,2 | – | | | – |
| Известняк:  сухой  влажный | | 0,7–2,5  0,9–4,4 | –  0,4–1,7 | | | –  3,9–17,0 |
| Мрамор | | 1,6–4,0 | 0,8–0,9 | | | 7,8–12,2 |
| Первичный осадок или порода | Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К) | | Удельная теплоемкость, кДж/(кг · К)  *Продолжение табл. 1.4.1* | | Коэффициент температуропроводности, м2 /с | |
| Осадки и образовавшиеся из них осадочные, метаморфические породы и руды | | | | | | |
| Доломит | | 1,6–6,5 | 0,6–1,5 | | | 8,26–16,8 |
| Мергель | | 0,5–3,6 | 0,6–3,1 | | | 3,14–13,9 |
| Гипс | | 0,6–1,7 | 0,9–1,1 | | | – |
| Ангидрит | | 2,5–5,8 | 8 0,5–0,6 | | | – |
| Каменная соль (чистая) | | 6,1–7,1 | – | | | – |
| Каменная соль | | 1,7–5,5 | 1,4–4,7 | | | 11,2–17,7 |
| Руда:  мартитовая и магнетитовая мартитовая джеспелитовидная  роговик магнетито-мартитовый  роговик мартитовый | | 5,0  5,0  4,2  4,3–4,8 | –  0,5  0,6  0,6–1,0 | | | –  25,3  22,5  – |
| Торф:  сухой  влажный | | 0,1  0,5 | –  – | | | –  – |
| Уголь | | 0,1–2,2 | 0,9–1,5 | | | 0,7–7 |
| Графит | | 1,1–17,4 | 0,7 | | | – |
| Дунит | | 1,1–1,9 | 0,6–0,8 | | | 7,1–8,5 |
| Перидотит | | 3,8–4,9 | 0,9–1,1 | | | 11,9–14,1 |
| Пироксенит | | 3,5–5,0 | 0,9–1,2 | | | 9,4–14,9 |
| Серпентинит | | 2,3–2,9 | 0,9–1,1 | | | – |
| Габбро | | 1,6–3,0 | 0,9–1,1 | | | 9,3–12,2 |
| Диорит | | 1,4–2,9 | 1,1–1,2 | | | 3,3–8,6 |
| Сиенит | | 1,8–3,0 | – | | | 5,4–7,9 |
| Гранит | | 1,1–3,9 | 0,2–1,5 | | | 3,3–16,5 |
| Базальт | | 0,4–3,5 | 0,5–2,1 | | | 3,4–13,4 |
| Андезит | | 1,4–2,8 | 0,8–0,82 | | | 6,2–6,4 |
| Трахит | | 1,7–2,6 | – | | | – |
| Обсидиан | | 1,3–1,6 | 0,9–1,2 | | | 5,5–5,9 |
| Первичный осадок или порода | | Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К) | Удельная теплоемкость, кДж/(кг · К) | | | Коэффициент температуропроводности, м2 /с |
| Осадки и образовавшиеся из них осадочные, метаморфические породы и руды | | | | | | |
| Пемза:  сухая  влажная | | 0,25  0,50 | –  – | | | –  – |
| Диабаз | | 1,7–3,3 | 0,8–0,9 | | | 5,0–12,0 |
| Порфирит | | 0,7–3,5 | 1,7–1,6 | | | 2,6–12,8 |
| Кварцевый порфир | | 1,8–2,6 | – | | | 5,0–6,9 |
| Пегматит | | 2,9–3,3 | – | | | – |
| Туф | | 1,3–4,0 | 0,8–1,4 | | | 10,0–12,4 |
| Лава | | 0,3–0,7 | 0,7–1,4 | | | 2,4–4,1 |
| Сланец | | 0,7–4,8 | 0,7–1,6 | | | 2,9–22,5 |
| Кристаллический сланец | | 2,7–2,9 | – | | | – |
| Гнейс | | 0,94–4,9 | 0,8–1,2 | | | 6,3–8,3 |
| Амфиболит | | 1,6–2,9 | 1,0–1,2 | | | 5.3–8,1 |
| Эклогит | | 2,3–3,5 | – | | | – |
| Роговик | | 2,1–6,1 | 1,4–1,5 | | | 13,4–15,6 |
| Скарн | | 1,5–3,0 | – | | | – |
| Чарнокит | | 1,0–1,5 | – | | | – |
| Руда:  серный колчедан  медный колчедан  густой вкрапленник пирита в кварцы  штаффелит-магнетитовая  апатит-форстерит-магнетитовая  магнетитовая | | 2,4–4,2  4,2  3,3  1,6–1,7  3,0–4,7  2,0–2,7 | 0,8–1,3  0,86–0,98  0,6  –  –  – | | | 9,9–10  10,3–10,5  13,6  5,0–5,4  8,6–14,1  – |

*Окончание табл. 1.4.1*

В большинстве случаев в табл. 1.4.1 отмечены диапазоны изменения коэффициентов теплопроводности, удельной теплоемкости и температуропроводности, иногда дающие значительный разброс параметров. Это вызвано рядом причин: неоднородностью изученных образцов, изменением их литолого-минералогического состава, разным типом цемента, соединяющего зерна породы, наличием примесей и т. д. Например, чистая каменная соль имеет узкий диапазон изменения коэффициента теплопроводности, 6,1–7,1 Вт/(м · К), что представляет интерес при вычислении интервальных значений плотности теплового потока. Наличие примесей глинистого материала приводит к снижению этого коэффициента до 1,7–5,5 Вт/(м · К), при этом он может изменяться в 2–3 раза. Это также относится и к другим тепловым параметрам – коэффициентам удельной теплоемкости и температуропроводности.

Удельная теплоемкость с горных пород и минералов представляет собой отношение количества теплоты ΔQ, сообщенного телу, к соответствующему повышению его температуры ΔТ. Удельная теплоемкость – это теплоемкость, отнесенная к единице объема тела. Иными словами, удельная теплоемкость представляет собой количество тепла, необходимое для нагревания единицы массы породы (1 кг) на 1 °С. Теплоемкость характеризует способность пород поглощать тепловую энергию. Она имеет значительно значение для разрушения пород при тепловом воздействии (термическом бурении, комбинированных термомеханических способах разрушения горных пород, оценке ресурсов геотермальной энергии) и др.

Единицы измерения теплоемкости в СИ – Дж/град, техническая – ккал/град, равная 4,1868 Дж/град; удельная теплоемкость в СИ – Дж/(кг · град), техническая – ккал/(кг · град), равная 4,1868 Дж/(кг · град). Теплоемкость горных пород изменяется в небольших пределах. Для большинства пород этот интервал равен 0,4–2 кДж/(кг · К); для металлов – 0,125 (золото, свинец), 0,46 кДж/(кг · К) (железо). Рудные минералы имеют низкую теплоемкость, а рудосодержащие породы – пониженную в сравнении с безрудными. Наличие в породах порового пространства, заполненного цементирующим материалом (глинистый, карбонатный и другие виды цемента), воздухом, водой, растворами солей, нефтью или льдом, оказывает существенное влияние на тепловые свойства: коэффициенты теплопроводности, удельную теплоемкость и температуропроводность.

Перемножение удельной теплоемкости с на плотность породы ρ дает объемную теплоемкость сρ. Она используется при решении задач конвективного теплопереноса, а также при оценке плотности ресурсов геотермальной энергии.

Сравнительные данные по теплопроводности и удельной теплоемкости для ряда минералов приведены в табл. 1.4.2.

Температуропроводность горных пород и минералов *а* представляет собой параметр, характеризующий скорость выравнивания температуры при нестационарной теплопроводности λ. Температуропроводность *а* = λ/сρ, где с – удельная теплоемкость и ρ – плотность породы. Единицы измерения: в СИ – м2 /с, техническая – м2 /ч, равная 2,788 · 10–4 м2 /с. Температуропроводность учитывают при решении задач нестационарного теплообмена.

*Таблица 1.4.2*

**Теплопроводность и удельная теплоемкость минералов**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Минерал | λ, Вт/(м • К) | *с*, Дж/(кг • К) | Минерал | λ, Вт/(м • К) | *с*, Дж/кг |
| Кварц (монокристалл) | ⊥ 1 6,5-7,2\* | - | Галит | 5,3-6,5 | 879,0 |
| || 11,3-13,2\* | - | Ангидрит | 4,91-5,75 | - |
| α-Кварц | 7,99 | - | Гипс | 1,30 | - |
| Альбит | 2,31 | 711,0 | Турмалин | 4,50 | - |
| Олигоклаз | 1,96 | 837,0 | Флюорит | 4,03 | - |
| Лабрадор | 1,5 | 837,4 | Рутил | ⊥ 1 7,14\* | - |
| Анортит | 1,7 | 711,0 | || 13,8\* | - |
| Ортоклаз | 2,31 | 628,0 | Барит | 1,7 | 460,5 |
| Микроклин | 2,42 | 669,0 | Топаз | 23,4 | - |
| Форстерит | 5,15 | 753,4 | Берилл | 8,4 | - |
| Фаялит | 3,16 | 628,0 | Корунд | 34,6 | 711,0 |
| Оливин | 5,0 | 795,3 | Циркон | 4,5 | 669,0 |
| Минерал | λ, Вт/(м • К) | *с*, Дж/(кг • К) | Минерал | λ, Вт/(м • К) | *с*, Дж/кг |
| Шпинель | 3,48 | - | Молибденит | - | 574,3 |
| Пироксен | 4,38 | 748,8 | Касситерит | - | 340 |
| Авгит | 3,82 | - | Ковеллин | - | 502,4 |
| Бронзит | 4,03 | - | Халькопирит | - | 534,3 |
| Энстатит | 4,39 | - | Куприт | - | 460,5 |
| Ставролит | 4,30 | - | Сфалерит | 26,7 | - |
| Андалузит | 7,57 | - | Пирит (моно­кристалл) | 38,9 | - |
| Жадеит | 5,61 | 753,4 |
| Диопсид | 5,76 | 711,0 | Гематит (поли­кристалл) | 10,4 | 628,0 |
| Серпентин | 1,70-2,47 | 950,2 |
| Нефелин | 1,75 | - | Гематит | || 12,1\* | - |
| Биотит | 1,95 | - | ⊥ 14,7\* | - |
| Флогопит | 2,29 | 879,0 | Магнетит | 5,3 | 586,1 |
| Мусковит | 2,32 | - | Лимонит | - | 921,1 |
| Пироп | 3,21 | 690,6 | Рутил | || 12,6-13,7\* | - |
| Альмандин | 3,31 | - | ⊥ 7,11-8,5\* | - |
| Кианит | 14,2 | - | Силлиманит | 9,1 | - |
| Гроссуляр | 5,46 | - | Окись урана | 9,66 | - |

\* Значки || и ⊥ обозначают, что значение λ измерено параллельно и перпендикулярно оптической оси соответственно.

*Окончание табл. 1.4.2*

**Глава 2.**

Геотермические исследования (терморазведка) объединяют геофизические методы исследования теплового пола Земли для изучения термического режима земной коры и верхней мантии, поиска геотермических ресурсов, решение поисково-разведочных и инженерно-гидрологических задач.

При проведении терморазведки регистрируют радиотепловое и инфракрасное излучение земной коры, измеряют ее температуру, вертикальный градиент температуры и тепловой поток. Распределение этих параметров в толще земной коры несет информацию о термических и гидрологических условиях и геологическом строении изучаемого района.

**2.1. Методы и аппаратура, применяемые для геотермических исследований**

В первых шагах терморазведки для измерений температуры в скважинах использовали «заленивленные», или «максимальные», ртутные термометры. Термометры помещали в металлические корпуса гильзу с теплоизолирующим слоем и спускали в скважину на заданную глубину на тросах или на штангах. Теплоизоляция при спуске «заленивленных» термометров предохраняла снижение показаний ртутного термометра при его подъеме из скважины.

Ртутные термометры давали только одно показание температуры за один спуск в скважину. При этом точность измерений была довольно низкая, имели место стряхивания столбика ртути даже при соприкосновении кормуса с термометром со стенками скважины. Для получения нескольких значений температуры было необходимо выполнять многократные спуски, процесс измерений был трудоемким. Вскоре эти приборы были вытеснены электрическими термометрами.

Для измерений электротермометром применяют термозависимые полупроводниковые либо металлические резисторы, входящие в состав зонда, спускаемого в скважину на электрическом кабеле, значительно реже – термопары, образованные спаем двух разнородных металлов. Сигнал, несущий информацию об измеренном электрическом сопротивлении скважинным зондом, передается на поверхность по кабелю.

В качестве металлического термочувствительного элемента используют медную или платиновую изолированную проволоку диаметром 0,05 мм, смотанную в жгут. В ряде случаев термочувствительным элементом служит металлическое напыление алюминия или платины на кремниевую подложку. Металлические термодатчики обладают линейной зависимостью изменения электрического сопротивления от температуры, однако крутизна преобразования температуры в электрическое сопротивление при этом достаточно низкая. Тепловая инерция такого термометра может быть снижена до 3–4 с, а чувствительность по температуре достигать 0,01 °С. Однако из-за некоторого перемешивания жидкости, заполняющей скважину, при спуске термометра с одной глубины на другую вследствие появления конвекции она увеличивается до 30–90 с. Схематично процесс регистрации температуры в скважине показан на рис. 2.1.1.

Для регистрации температуры в скважинах в последние годы используют цифровые скважинные термометры различных конструкций, чувствительность которых при регистрации температуры может достигать или превышать 0,01 °С. В цифровых скважинных термометрах изменяющееся под влиянием температуры сопротивление термочувствительного элемента преобразуется в цифровой сигнал, чаще всего в самой конструкции зонда. Этот сигнал передается на регистратор, который располагается на поверхности в виде значения температуры, а также заносится в оперативную память термометра.

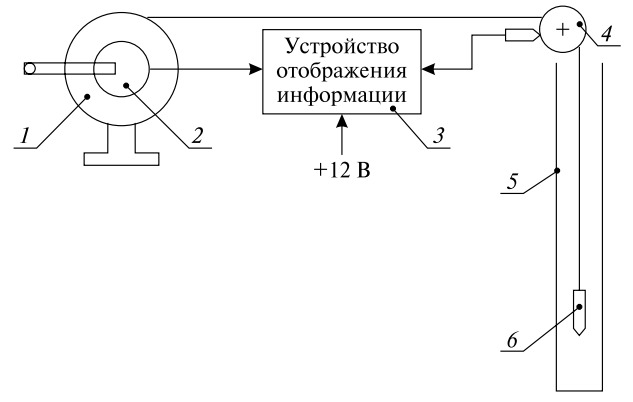
 Каждый термометр градуируют в термостате в нескольких точках проектного диапазона его измерений. В качестве эталонов используют ртутные термометры типа ТР-1 с ценой деления 0,01 °С. Таблицу зависимости температуры Т от текущего значения сопротивления металлического термодатчика R определяют из соотношения T=AR+B, где А и В – постоянные коэффициенты. При полевых измерениях на постоянном токе скважинный термометр с полупроводниковым датчиком соединяется с наземным измерителем сопротивления по

Рис. 2.1.1. Принцип регистрации термограмм скважинным термометром: 1 – ручная либо машинная лебедка; 2 – щеточный узел (коллектор); 3 – устройство отображения информации; 4 – блок-баланс с датчиком глубины погружения; 5 – стенка скважины; 6 – скважинный зонд

трех- или четырехпроводной мостовой схеме, в ряде приборов – по потенциометрической. Четырехпроводная схема более предпочтительна, поскольку исключает влияние сопротивления жил используемого кабеля на результаты измерения.

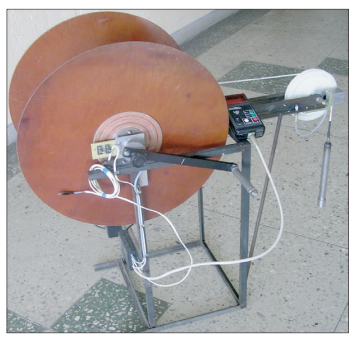
 В цифровом термометре обычно используют двухпроводную схему, по которой подается питание к зонду и выдается цифровой сигнал на. Макет подобного термометра приведен на рис. 2.1.2.

Рис. 2.1.2. Общий вид цифрового скважинного термометра

У термометров отрицательный коэффициент зависимости сопротивления терморезистора от температуры (крутизной преобразования) до 5–6 % на градус, что позволяет повысить чувствительность таких термометров до 0,001– 0,01 °С. Из недостатков можно выделить старение терморезисторов, что приводит к необходимости их периодической градуировки.

В Советском Союзе геотермические исследования стали активно развиваться с конца 50-х – начала 60-х гг. XX в. Тогда для регистрации температуры в скважинах точечным методом использовались четырехпроводная, трехпроводная мостовые и потенциометрические схемы.

Измеряемое сопротивление Rx определяют по соотношению

В скважинный зонде монтируют отградуированный в лаборатории термочувствительный полупроводниковый или металлический резистор (терморезистор), присоединяют с помощью кабеля к измерительному мосту, который расположен на земной поверхности. Электрическое сопротивление терморезистора соединено последовательно с сопротивлением двух жил кабеля. С помощью декад моста балансируют высокочувствительный гальванометр до получения его нулевого отклонения и по показаниям декад моста отсчитывают общее сопротивление образовавшейся электрической цепи.

Чтобы получить значение сопротивления только терморезистора, необходимо измерить отдельно сопротивление двух жил кабеля посредством переключателя П и вычесть сопротивление жил из измеренного общего сопротивления электрической цепи. Затем по градуировочным таблицам определяют измеренную температуру. Сопротивление каждой из жил кабеля может незначительно отличаться. Четырехпроводная схема также позволяет измерять сопротивление и второй пары жил кабеля. Это необходимо для получения более достоверных данных.

Как правило, выбирают номиналы отградуированных полупроводниковых терморезисторов, например кобальто-марганцевых КМТ-1 или медно-марганцевых ММТ-1, которые равны 10–20 кОм. Терморезисторы работают в диапазоне от отрицательной температуры до +160 ... +180 °С. Также они имеют высокую отрицательную крутизну преобразования 5–6 %/°C от собственного сопротивления. Этот параметр понижается до 1,5–2 %/°C с повышением температуры до +150 ... +200 °С. При должной градуировке в лабораторных условиях достигается погрешность измерения температуры около 0,02–0,03 °С.

Сопротивление двух медных жил кабеля при измерении в относительно мелких скважинах (первые сотни метров) составляет около 10–20 Ом, что на три порядка меньше сопротивления терморезистора. Поэтому изменением сопротивления кабеля под влиянием увеличивающейся температуры в процессе спуска зонда в скважину зачастую можно пренебречь, считая, что сопротивление жил постоянно. В таком случае можно использовать двухпроводный скважинный кабель.

Скважинные термометры на основе полупроводниковых терморезисторов имеют следующие эксплуатационные недостатки:

* для недопущения нагрева тела терморезистора на несколько сотых долей градуса измерительным током, приходится снижать его величину до 0,5–1 мА при напряжении батареи, питающей электрический мост не более 0,5–1 В. Для этого требуется высокочувствительный гальванометр. Поэтому при измерениях часто используют выносной гальванометр, такой как, например М95 с ценой деления около 1–5 ⋅ 10–9 А/дел;
* каждый полупроводниковый терморезистор требует индивидуальной периодической повторной градуировки, она часто выполняется непосредственно перед полевыми измерениями. Это связано с тем, что терморезисторы медленно меняют свои характеристики из-за старения;
* при малом токе в измерительной цепи существенное влияние на результаты оказывает снижение сопротивления изоляции между жилами спущенного в скважину и подверженного растяжению кабеля за счет его собственного веса;
* нелинейная в первом приближении логарифмическая зависимость сопротивления терморезистора от температуры.

Время до повторной градуировки зависит от частоты использования датчика на полевых работах, рекомендуемый интервал – от трех – четырех месяцев до года. Терморезисторы после изготовления требуют более частой градуировки из-за ускоренного старения. При длительном хранении терморезистора влияние старения постепенно уменьшается.

Для градуировки терморезисторов используют ультратермостаты, которые позволяют стабилизировать и поддерживать заданную температуру. Контроль над ее значением осуществляется по ртутным эталонным термометрам ТР-1 (цена деления – 0,01 °С) либо ТР-2 (цена деления – 0,02 °С). По результатам градуировки составляют таблицы и рассчитывают значения температуры с требуемым шагом для всего диапазона градуировки. В дальнейшем они используются для пересчета значения сопротивлений терморезистора в значения соответствующей температуры. Температурная зависимость сопротивления терморезистора определяется соотношением

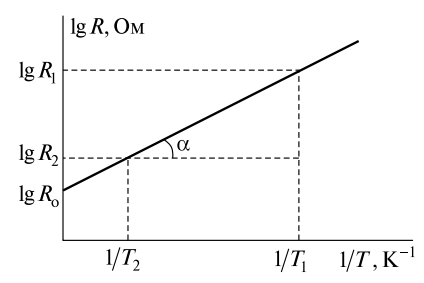
где R и Т – рассчитанное значение сопротивления терморезистора при температуре Т; Ro и В – постоянные коэффициенты. Это выражение есть уравнение прямой в координатах 1/T и lnR (рис. 2.1.3).

Рис. 2.1.3. Зависимость сопротивления терморезистора от температуры

На практике зачастую используют более сложные эмпирические уравнения. Для диапазона измерения температуры до +50 °С предложено эмпирическое уравнение

Для более широкого интервала измеряемой температуры И. М. Кутасов рекомендовал зависимость

где коэффициенты A, B, C остаются постоянными в интервале изменения температуры 0 ... +150 °С и для их определения необходимо снять в термостате как минимум три градуировочных значения сопротивления терморезистора R1, R2 и R3 при значениях температуры Т1, Т2 и Т3, распределенных в интервале градуировки. Каждый из интервалов температуры в предпоследнем соотношении можно вычислить по формулам

В последних же выражениях коэффициенты А, В и С определяют как

(2.8)

(2.9)

(2.10)

;

;

.

В случае применения электротермометра для измерения температуры в скважинах на основе потенциометрической схемы используется компенсационный метод измерения электродвижущей силы (ЭДС), например от термопары, находящейся в скважинном зонде. Спай двух различных металлов образует термопару, ЭДС которой на выводах увеличивается с ростом температуры этого спая. Вырабатываемая термопарой ЭДС обычно находится в диапазоне милливольт. В измерительной цепи потенциометрической схемы применяют нормальный элемент (НЭ) – источник тока с известным заранее высокоточным и стабильным напряжением. Нормальные элементы, применяемые в качестве образцовых мер ЭДС, могут использоваться в компенсационных схемах, приборах и различных устройствах при точных измерениях ЭДС и напряжения, электрического тока (например, в измерительных потенциометрах), а в сочетании с термопарами применяются для измерения неэлектрических величин (например, температуры). Номинальные значения ЭДС различных НЭ лежат в диапазоне 1,018–1,019 В. В этом случае четырехпроводная схема скважинного термометра предпочтительнее трехпроводной схемы. Она более устойчива по отношению к «паразитным ЭДС» в измерительной цепи. В этой схеме предусматривается переключение направления тока, что позволяет и отметить, и исключить влияние «паразитных ЭДС».

Как отмечалось, в качестве термочувствительного элемента в скважинном зонде могут использоваться металлические терморезисторы, изготовленные из весьма тонкой платиновой либо медной проволоки. К достоинствам меди следует отнести низкую стоимость, линейную зависимость сопротивления от температуры, возможность получения тонкой проволоки высокой степени чистоты в различной изоляции. Недостаток медных термометров сопротивления заключается в низком верхнем пределе измерения (180 °С), что вызвано значительным окислением меди при высоких температурах из-за разрушения изоляции. Медь имеет малое удельное сопротивление (ρ = 0,0175 · 10–6 Ом · м). В диапазоне температур от –50 до +180 °С сопротивление меди находится в линейной зависимости от температуры:

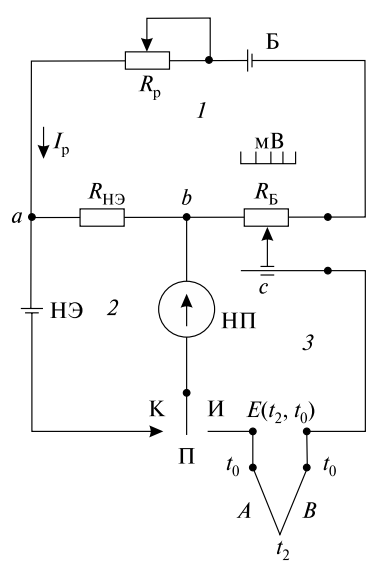
где R0 и Rt – соответственно сопротивления (Ом) при 0 °С и температуре t. Принципиальная схема потенциометра, который состоит из трех контуров – измерительного 1, нормального элемента 2 и термопары 3 – приведена на рис. 2.1.4

Рис. 2.1.4. Упрощенная принципиальная схема неавтоматического потенциометра:

контуры: 1 – измерительный; 2 – нормального элемента; 3 – термопары: A, B – плечи термопары; c – движок реохорда; Б – источник питания; НЭ – нормальный элемент; НП – нуль-прибор; П – переключатель (его положения: К – контроль и И – измерение); RНЭ – постоянное сопротивление нормального элемента; переменные сопротивления: RБ – батареи и Rр – реохорда; Iр – рабочий ток; E(t2, t0) – падение напряжения на участке bc реохорда; мВ – милливольты

Схема включает: источник питания Б, нормальный элемент НЭ, нуль-прибор НП (миллиамперметр с нулем посередине шкалы), переключатель П, одно постоянное RНЭ и два переменных сопротивления: батареи RБ и реохорда Rр. Назначение НЭ состоит в стандартизации величины компенсирующего (рабочего тока) I батареи Б.

Линейная зависимость показаний выполняется лишь при условии соблюдения постоянства сопротивления измерительного контура 1 и величины рабочего тока Ip. Первое условие обеспечивается изготовлением резисторов из манганиновой проволоки, а второе – периодической установкой величины тока, что вызвано изменением напряжения батареи питания. Высокая точность измерения достигается за счет использования для стандартизации рабочего тока специальных нормальных элементов, которые характеризуются весьма высокой стабильностью развиваемой ЭДС. Так, для НЭ класса точности 0,02 (ЕНЭ = 1018,90 ± 0,04 мВ) допускаемое изменение ЭДС за год составляет 0,20 мВ. Следовательно, после пяти лет работы изменение характеристики составит не более 1 мВ (0,1 %).

Измерительная схема скважинного зонда помещается внутри металлического корпуса, имеющего небольшую тепловую инерционность, способного обеспечивать герметизацию электрических элементов и выдерживать давление столба жидкости, заполняющего ствол скважины.

С 1980-х гг. для выполнения научных геотермических исследований в скважинах стали применять цифровые скважинные термометры, в которых в качестве датчика температуры использованы термочувствительные кварцевые резонаторы. Были разработаны высокочувствительные цифровые термометры, в которых непосредственно в самом зонде полезный сигнал преобразуется в цифровой код, передающийся в градусах Цельсия на цифровой регистратор, расположенный на земной поверхности.

В частотных кварцевых термометрах в качестве датчика применяются термозависимые кварцевые резонаторы с крутизной преобразования порядка 200 Гц/°С. Несущая частота кварцевых резонаторов в зависимости от модели может изменяться от сотен килогерц до мегагерц. При передаче на поверхность из-за емкости каротажного кабеля происходит быстрое затухание амплитулы высокочастотного сигнала, поэтому частоту понижают с помощью опорного генератора со стабильной частотой, выделяя только полезный низкочастотный сигнал, который можно передать по кабелю. С помощью частотомеров он регистрируется компьютером с пересчетом частоты в температуру.

**2.2. Принципы теории терморазведки**

Теория терморазведки основывается на решении уравнения теплопроводности

характеризующего изменение температуры T по осям координат (x, y, z) во времени t с учетом температуропроводности ( = λТ/сσ).

Для расчета вертикального теплового потока применяют следующую формулу:

где

Г – температурный градиент или изменение температур T2 и T1 на глубинах z2 и z1 (ось z направлена вниз по нормали к поверхности); λТ – коэффициент теплопроводности; – плотность; C – теплоемкость; Vz – вертикальная скорость конвекции (или скорость фильтрации подземных вод, если считать, что конвекция осуществляется в основном за счет подземных вод); T – температура на глубине z=(z1+z2)/2, =T/C.

Если конвекция вод идет вверх, что наблюдается в слабопроницаемых слоях на глубинах свыше 100 м, то теплопроводный и конвективный тепловые потоки складываются (–Vz), при фильтрации вниз – вычитаются (Vz).

В условиях скальных пород, а также стационарного теплообмена конвекцией можно пренебречь (Vz) и тепловой поток равен qz= Г, т.е. он определяется только теплопроводностью пород и температурным градиентом.

Региональный тепловой поток Земли может быть рассчитан через измеренные на разных глубинах температуры и тепловые свойства среды, в основном теплопроводность. Решая уравнение (2.12) с учетом выражения (2.13), можно получить формулу для расчета суммарного теплового потока из недр Земли:

где T1 – температура на глубине z1; Г – геотермический градиент на двух глубинах z1 и z2; Vz – вертикальная скорость конвекции.

При решении прямых задач терморазведки часто Землю принимают за однородное полупространство с постоянным тепловым потоком qсум. Решая уравнение (1.1) с учетом выражения (1.3) и граничных условий для тел простой геометрической формы (шар, столб, цилиндр и т.п.) или горизонтально-слоистой среды с разными тепловыми свойствами, можно получить аналитические выражения для аномальных тепловых потоков или температур. При сравнении теоретически рассчитанных кривых с наблюденными выявляются геотермические аномалии, количественная интерпретация которых позволяет оценить положение, глубины залегания аномалиеобразующих локальных объектов.

Основным параметром, используемыым в терморазведке, является теплопроводность, характеризующая способность сред и горных пород передавать тепло. В теории терморазведки доказано, что при температурах до 1000 ºС теплопроводность обратно пропорциональна температуре. В связи с этим средняя теплопроводность до глубин около 100 км, где ожидаются такие температуры, понижается примерно в 3 раза по сравнению со средней теплопроводностью поверхностных отложений. На глубинах свыше 100 км теплопроводность постепенно повышается, что объясняется ростом с глубиной давления и лучистого теплообмена. Эта зона пониженной теплопроводности в мантии служит препятствием для оттока тепла к поверхности и способствует возрастанию температур с глубиной. Теплопроводность горных пород зависит от минерального состава, структуры, текстуры, плотности, пористости, влажности, температуры. Минеральный состав магматических, метаморфических и осадочных пород не очень влияет на их теплопроводность. Плотность, пористость и давление, под которым находятся горные породы, связаны между собой. При повышении плотности и давления, а значит, понижении пористости теплопроводность пород повышается. С увеличением влажности горных пород их теплопроводность резко увеличивается.

**2.3. Данные, получаемые из термограмм скважин**

При описании геотермического поля важным параметром является температура Т воды, грунта, а также любого слоя горной породы. Однако дать исчерпывающую характеристику геотермического поля недр, описав его только одной температурой, невозможно, поскольку температура зависит как от глубины залегания пластов горных пород, так и от широты, а иногда и от альтитуды местности. Например, в экваториальных зонах при умеренных альтитудах не встречается мерзлый грунт, за исключением вершин гор, тогда как в зонах многолетней мерзлоты это повсеместное явление, здесь зона мерзлоты может распространяться до глубины 700–1000 м. Поэтому, чтобы нормировать температуру по глубине, введено понятие геотермического градиента (grad T), который является векторной величиной и описывается выражением

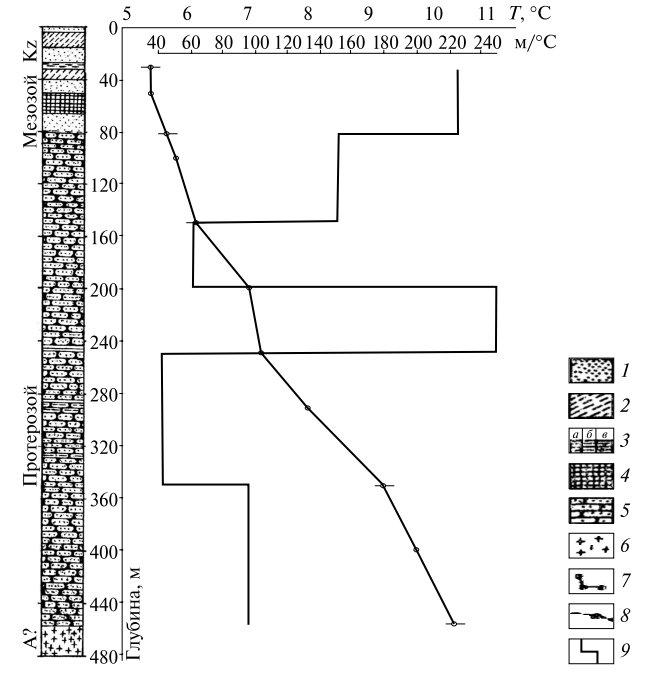
Здесь i, j и k – единичные орты вдоль координатных осей x, y, z. Геотермический градиент характеризует темп роста температуры при изменении глубины на 1, 100 либо на 1000 м и измеряется в мК/м, °С/100 м, °С/1000 м соответственно. Величина, обратная геотермическому градиенту, – это геотермическая ступень. Она показывает, на каком интервале глубины температура увеличивается на 1 °С. Обычно она измеряется как м/°С (рис. 2.3.1). При наличии техногенных нарушений, например вызванных закачкой газа в подземное хранилище либо при отсутствии герметичности обсадной колонны, термограмма и геотермический градиент имеют вид, как показано на рис. 2.3.2. Данные по этому интервалу с нарушенной термограммой и геотермическим градиентом не могут быть использованы для определения плотности теплового потока и расчленения геологического разреза по геотермическому градиенту.

Рис. 2.3.1. Изменение температуры и геотермической ступени Подлясско-Брестской впадины в скважине 15:

1 – песок среднезернистый; 2 – супесь; 3 – обломочная порода (а – песок глинистый; б – глина; в – алевролит); 4 – мел; 5 – песчаник; 6 – гранит, гнейс; 7 – термограмма; 8 – участки с постоянным градиентом; 9 – геотермическая ступень, м/°С

Геотермический градиент зависит от плотности теплового потока в массиве горных пород и коэффициента теплопроводности слагающих его слоев. Изучая вертикальную изменчивость градиента по стволу скважины, можно расчленить ее геологический разрез, поскольку слои имеют разную теплопроводность λ. При постоянном тепловом потоке это приводит к изменению градиента в каждом слое. Постоянство же теплового потока наблюдается только в горизонтально-слоистой среде при отсутствии внутренних источников тепла и конвекции вследствие циркуляции в ней подземных вод и рассолов. Тогда для слоев с номерами n – 1, n и n + 1 сохраняется равенство плотности теплового потока qn – 1 = qn = qn + 1. Или в другой форме записи:

где n – номер слоя.

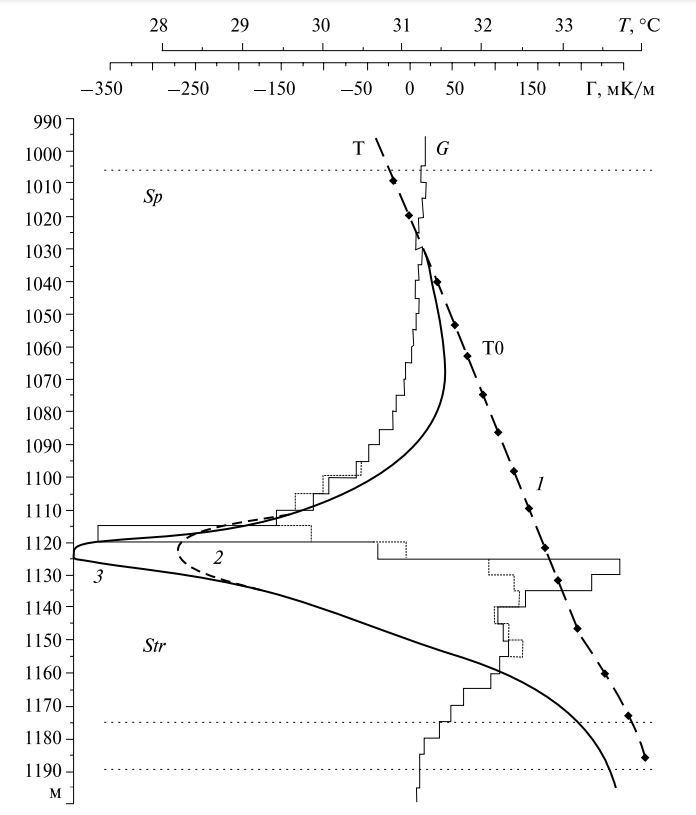


Рис. 2.3.2. Термограммы и геотермический градиент спановских (Sp) и страдечских (Str) отложений в скважине 26-к Прибугского подземного хранилища газа (Подлясско-Брестская впадина), выполненные в разное время:

1 – 1998 г.; 2 – апрель 2009 г.; 3 – ноябрь 2009 г.: Т0 – ненарушенная термограмма; Т – нарушенная термограмма перетоком газа; G – градиентограмма

Рассмотрение геотермического градиента дает возможность расчленять геологические разрезы по геотермическим данным, так как изменение теплопроводности слоев приводит к обратно пропорциональному изменению геотермического градиента G. Как отмечалось, знание геотермического градиента и коэффициента теплопроводности необходимо для корректного определения плотности теплового потока. Тепловой поток рассматривается в геотермии как наиболее информативный параметр, позволяющий судить о тепловом режиме земных недр на изучаемых интервалах глубины. Он характеризует тепловое состояние участков платформенного чехла и верхней части земной коры и направлен в массивах горных пород из недр к земной поверхности за исключением гелиотермозоны. Поток определяет теплопотери с этой поверхности. Выявлена корреляция теплового потока с параметрами других геофизических полей: с гравитационными (Δg) и магнитными (ΔT) аномалиями эта связь характеризуется похожими генетическими факторами, создающими такие аномалии. Тепловой поток – векторная величина (имеющая, в отличие от скалярной температуры, также и направление):

Поскольку горизонтальные составляющие потока определить сложно, на практике последнее уравнение сводится к одномерному выражению. Геотермический градиент вычисляют, чтобы снизить погрешность его определения, как правило, на интервале 10 и более метров:

В действительности же при наличии структурно-теплофизических неоднородностей, например в условиях соляной тектоники, вектор потока несколько отличается от вертикального, определенного при измерениях в вертикальных скважинах. В теории тепловой поток не зависит от интервала и глубины его определения. На практике оказалось, что во многих случаях это не выполняется, поскольку в верхней части геологического разреза сказывается влияние циркуляции подземных вод, палеоклиматических эффектов, рельефа местности и др. В этом отношении на изменение плотности теплового потока может оказывать влияние ряд комбинаций значений геотермического градиента и теплопроводности. Это может быть постоянный в интервале геотермический градиент, при этом разрез однороден и теплопроводность не изменяется, тогда тепловой поток q = λ · gradT остается постоянным. Если градиент и теплопроводность изменяются по глубине, то в ряде случаев поток вычисляют как произведение средневзвешенных значений градиента G и теплопроводности λ:

где i – номер слоя с известными градиентом и теплопроводностью. Если увеличение/уменьшение градиента соотносится с одновременным и пропорциональным уменьшением/увеличением теплопроводности соответственно, то тепловой поток может сохраняться неизменным, однако это требует проверки. Наконец, если геотермический градиент монотонно меняется с глубиной, тогда интервальные значения плотности теплового потока также будут меняться с глубиной.

**2.4. Достоверность геотермических данных**

Качество и надежность получаемых результатов в значительной мере определяется используемыми при проведении полевых и лабораторных работ геотермическими приборами и аппаратурой. Важное свойство применяемых приборов и методов обработки результатов – их чувствительность и точность. Над их совершенствованием постоянно работают специалисты в области геотермического приборостроения. Вопросам повышения представительности и достоверности получаемых результатов посвящен ряд научных исследований и публикаций. Немаловажную роль также играют применяемые при этом методики проведения исследований и интерпретации получаемых геотермических данных.

Термограммы скважин служат первичным материалом при изучении плотности теплового потока, оценке геотермальных ресурсов недр. Тепловые свойства горных пород также важны. При отсутствии кернового материала, например, коэффициент теплопроводности можно определить по опубликованным данным, если известен геологический разрез. Если же в районе исследований буровые скважины отсутствуют, то зарегистрировать термограммы и выполнить кондиционные определения теплового потока в большинстве случаев не представляется возможным.

На практике при бурении скважин далеко не всегда удается обеспечить их выстойку (выдержку в покое) в течение необходимого интервала времени для полного восстановления теплового поля массива горных пород, нарушенного циркуляцией бурового раствора. Это влияет на качество зарегистрированных термограмм, геотермический градиент отдельных интервалов глубины, а следовательно, и на интервальные значения плотности теплового потока.

В ряде случаев при отсутствии более надежных данных приходится использовать термограммы производственного термокаротажа, выполненного при недостаточной выдержке скважин в покое. В отдельных случаях, например при отбивке уровня подъема цемента в заколонном пространстве и отбивке положения цементного кольца геотермическим методом, регистрацию термограммы производят спустя первые часы «выдержки» скважины после завершения продавки цементного раствора. Иногда, в частности при бурении нефтяных скважин, имеются лишь несколько (два-три или больше) одиночных определений температуры при промежуточных положениях забоя, которые могут дать лишь приближенное представление об изменении температуры с глубиной. Получаемые в этом случае измерения требуют тщательного анализа и отбраковки ненадежных данных перед их использованием для геотермических построений.

**Глава 3.**

**3.1.** **Описание экспериментальной установки и принцип её работы**

Для физического моделирования геотермических исследований и исследования распределения тепла в среде была создана экспериментальная установка.

Схематично ее можно наблюдать на рис. 3.1.1.­­

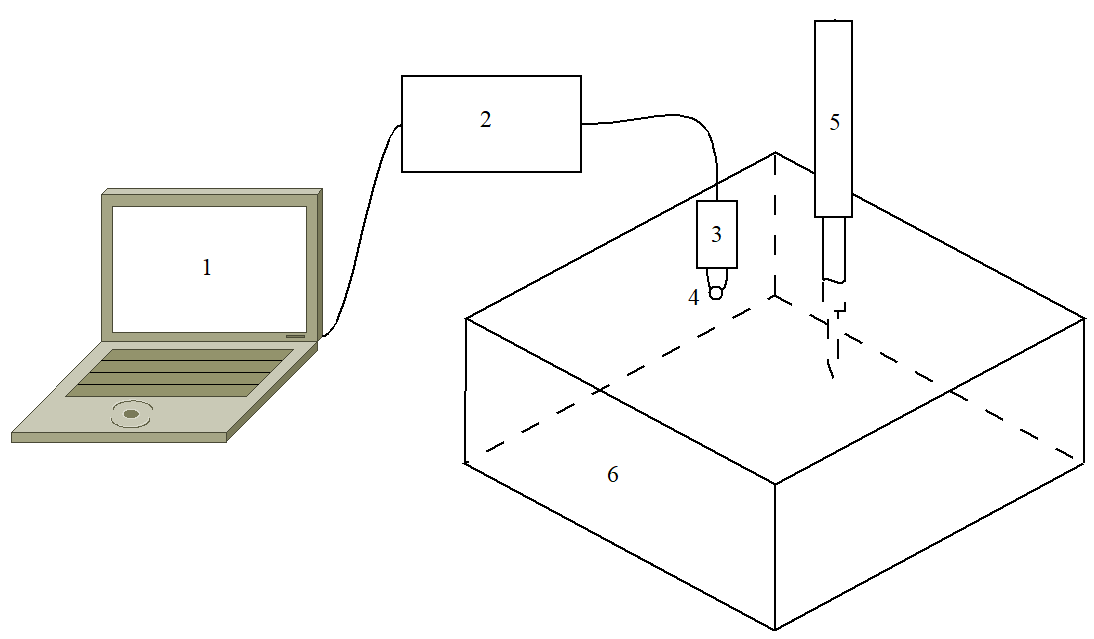


Рис. 3.1.1. Схема экспериментальной установки.

1 – компьюетр; 2 – плата Arduino Mega; 3 – модуль датчика температуры KY-028; 4 – терморезистор модулядатчика температуры; 5 – нагревательный элемент; 6 – емкость с песком

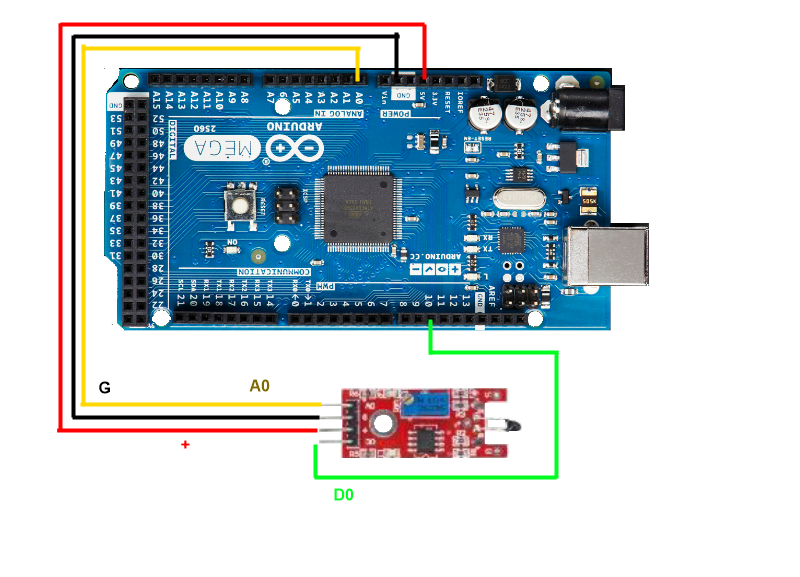
 Для установки был выбран строительный песок, который достаточно однороден, чтобы считать его изотропной средой. Емкость была выполнена из толстого полиэтилена для герметичности в случае смачивания песка. В качестве нагревательного элемента был выбран паяльник мощностью 40 Ватт. Измерения проводились с помощью модуля датчика температуры KY-028, включающего в себя терморезистор с рабочим диапазоном -55℃ ~ +125℃ и шагом измерений +/- 0.5℃. Терморезистор был выбран, потому что в термометрии скважин отдается предпочтение именно терморезисторам. Модуль датчика температуры подключался к плате Arduino Mega по схеме, представленной на рис. 3.1.2.

Рис. 3.1.2. схема подключения модуля датчика температуры KY-028 к плате Arduino Mega

Плата Arduino Mega подключалась к компьютеру. В программном обеспечении для Arduino с помощью кода из приложения А показывалась температура на терморезисторе. Терморезистор был откалиброван по ртутным термометрам.

**3.2. Методика проведения измерений**

Физическое моделирование геотермических исследований проводиться следующим образом, в емкость с 15 кг песка вставляется паяльник таким образом, чтобы самая горячая его часть была на уровне поверхности песка, так как измерения температуры проводились именно на поверхности, на глубине около 10 мм, поскольку датчик температуры достаточно хрупкий, чтобы погружать его на большую глубину в песок. Измерения проводились каждые 15 минут после включения источника тепла до установления стационарного режима, когда температура переставала меняться из-за рассеяния тепла в окружающую среду, время установления стационарного режима для сухого песка составляет порядка 4 часов, а для влажного порядка 3 часов. Измерения проводились с шагом 2,5 см между точками съемки, 9 точек по горизонтали (источник сверху над средней линией точек) и 11 точки по вертикали (рис. 3.2.2.).

В первой серии измерений температуры использовался сухой песок, его начальная температура составляла 24℃. Данные измерений температуры для сухого песка представлены в таблице 3.2.1. Поле распределение температуры для сухого песка приведено в приложении Б.

Таблица 3.2.1.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 0 минут после включения источника тепла | | | | | | | | |
| 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 15 минут после включения источника тепла | | | | | | | | |
| 25 | 26 | 27,1 | 30 | 33,9 | 30,4 | 27,3 | 26,2 | 25 |
| 24,9 | 25,6 | 26,4 | 28,5 | 30,1 | 28,3 | 26,4 | 25,8 | 25 |
| 24,8 | 25,2 | 25,6 | 26,3 | 27,4 | 26,5 | 26,3 | 25,7 | 25,1 |
| 24,5 | 24,8 | 25 | 25,9 | 26,6 | 26,1 | 25,6 | 25,1 | 24,7 |
| 24,3 | 24,5 | 24,6 | 25,2 | 25,6 | 25,2 | 24,8 | 24,6 | 24,5 |
| 24,3 | 25,1 | 24,6 | 25 | 25,3 | 25 | 24,8 | 24,6 | 24,5 |
| 24,3 | 24,5 | 24,6 | 24,8 | 25 | 24,9 | 24,8 | 24,5 | 24,5 |
| 24,1 | 24,2 | 24,4 | 24,5 | 24,4 | 24,4 | 24,5 | 24,3 | 24,2 |
| 24,1 | 24 | 24,1 | 24,1 | 24,1 | 24 | 24,1 | 24 | 24 |
| 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 30 минут после включения источника тепла | | | | | | | | |
| 26 | 28,1 | 30,3 | 35,9 | 43,8 | 36,8 | 30,6 | 28,4 | 26 |
| 25,9 | 27,2 | 28,7 | 33,1 | 36,1 | 32,6 | 28,9 | 27,6 | 26,1 |
| 25,7 | 26,4 | 27,3 | 28,7 | 30,7 | 29 | 28,5 | 27,4 | 26,2 |
| 25,1 | 25,7 | 26,1 | 27,8 | 29,1 | 28,1 | 27,3 | 26,3 | 25,3 |
| 24,7 | 25 | 25,3 | 26,4 | 27,2 | 26,3 | 25,5 | 25,2 | 24,9 |
| 24,6 | 26,3 | 25,3 | 26 | 26,6 | 26,1 | 25,5 | 25,1 | 24,9 |
| 24,5 | 24,9 | 25,3 | 25,6 | 25,9 | 25,7 | 25,5 | 25 | 24,9 |
| 24,2 | 24,4 | 24,8 | 24,9 | 24,7 | 24,9 | 24,9 | 24,7 | 24,4 |
| 24,2 | 24,1 | 24,2 | 24,1 | 24,1 | 24,1 | 24,2 | 24,1 | 24 |
| 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 45 минут после включения источника тепла | | | | | | | | |
| 26,9 | 30,1 | 33,4 | 41,9 | 53,6 | 43,1 | 33,9 | 30,5 | 27 |
| 26,8 | 28,8 | 31,1 | 37,6 | 42,2 | 36,9 | 31,3 | 29,4 | 27,1 |
| 26,5 | 27,5 | 28,9 | 31 | 34,1 | 31,5 | 30,8 | 29,1 | 27,2 |
| 25,6 | 26,5 | 27,1 | 29,6 | 31,7 | 30,2 | 28,9 | 27,4 | 26 |
| 25 | 25,4 | 25,9 | 27,5 | 28,8 | 27,5 | 26,3 | 25,7 | 25,4 |
| 24,8 | 27,4 | 25,9 | 26,9 | 27,8 | 27,1 | 26,3 | 25,7 | 25,4 |
| 24,8 | 25,4 | 25,9 | 26,4 | 26,9 | 26,6 | 26,3 | 25,4 | 25,4 |
| 24,3 | 24,5 | 25,2 | 25,4 | 25,1 | 25,3 | 25,4 | 25 | 24,5 |
| 24,2 | 24,1 | 24,2 | 24,2 | 24,2 | 24,1 | 24,2 | 24,1 | 24 |
| 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 60 минут после включения источника тепла | | | | | | | | |
| 27,9 | 32,1 | 36,5 | 47,8 | 63,5 | 49,5 | 37,2 | 32,7 | 28 |
| 27,7 | 30,4 | 33,4 | 42,1 | 48,2 | 41,2 | 33,7 | 31,2 | 28,1 |
| 27,3 | 28,7 | 30,5 | 33,3 | 37,4 | 34 | 33 | 30,8 | 28,3 |
| 26,1 | 27,3 | 28,1 | 31,5 | 34,2 | 32,2 | 30,5 | 28,5 | 26,6 |
| 25,3 | 25,9 | 26,5 | 28,7 | 30,4 | 28,6 | 27 | 26,3 | 25,8 |
| 25,1 | 28,5 | 26,5 | 27,9 | 29,1 | 28,1 | 27 | 26,2 | 25,8 |
| 25 | 25,8 | 26,5 | 27,2 | 27,8 | 27,4 | 27 | 25,9 | 25,8 |
| 24,4 | 24,7 | 25,6 | 25,8 | 25,4 | 25,7 | 25,8 | 25,3 | 24,7 |
| 24,3 | 24,1 | 24,3 | 24,2 | 24,2 | 24,1 | 24,3 | 24,1 | 24 |
| 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 75 минут после включения источника тепла | | | | | | | | |
| 28,5 | 32,7 | 37,2 | 48,7 | 63,7 | 50 | 38 | 33,3 | 28,8 |
| 28,2 | 31 | 34,1 | 42,4 | 49 | 41,8 | 34,6 | 31,9 | 28,7 |
| 27,7 | 29,3 | 31,1 | 34 | 37,8 | 34,6 | 33,3 | 31,1 | 28,7 |
| 26,5 | 27,8 | 28,7 | 31,8 | 34,4 | 32,3 | 30,8 | 28,8 | 27 |
| 25,6 | 26,3 | 26,9 | 28,9 | 30,4 | 28,9 | 27,5 | 26,7 | 26,1 |
| 25,3 | 28 | 26,6 | 27,9 | 29 | 28,1 | 27,1 | 26,4 | 25,8 |
| 25 | 25,7 | 26,3 | 26,9 | 27,5 | 27,1 | 26,7 | 25,8 | 25,6 |
| 24,4 | 24,7 | 25,4 | 25,7 | 25,4 | 25,6 | 25,6 | 25,1 | 24,7 |
| 24,2 | 24,1 | 24,2 | 24,2 | 24,3 | 24,2 | 24,3 | 24,1 | 24 |
| 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 90 минут после включения источника тепла | | | | | | | | |
| 29,1 | 33,3 | 37,9 | 49,7 | 63,9 | 50,4 | 38,7 | 33,8 | 29,6 |
| 28,7 | 31,5 | 34,8 | 42,7 | 49,9 | 42,5 | 35,5 | 32,6 | 29,4 |
| 28,2 | 29,9 | 31,8 | 34,7 | 38,2 | 35,3 | 33,6 | 31,4 | 29 |
| 27 | 28,3 | 29,4 | 32,2 | 34,5 | 32,4 | 31,1 | 29 | 27,5 |
| 25,9 | 26,6 | 27,3 | 29 | 30,4 | 29,1 | 27,9 | 27 | 26,3 |
| 25,4 | 27,5 | 26,7 | 27,8 | 28,9 | 28,1 | 27,2 | 26,6 | 25,8 |
| 25 | 25,6 | 26 | 26,7 | 27,2 | 26,9 | 26,4 | 25,7 | 25,4 |
| 24,5 | 24,7 | 25,3 | 25,6 | 25,5 | 25,5 | 25,5 | 24,8 | 24,7 |
| 24,1 | 24 | 24,2 | 24,2 | 24,3 | 24,2 | 24,3 | 24,1 | 24,1 |
| 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 105 минут после включения источника тепла | | | | | | | | |
| 29,7 | 33,9 | 38,6 | 50,6 | 64 | 50,9 | 39,5 | 34,4 | 30,3 |
| 29,1 | 32,1 | 35,4 | 42,9 | 50,7 | 43,1 | 36,4 | 33,2 | 30 |
| 28,6 | 30,5 | 32,4 | 35,3 | 38,6 | 35,9 | 33,9 | 31,6 | 29,4 |
| 27,4 | 28,7 | 30 | 32,5 | 34,7 | 32,4 | 31,4 | 29,3 | 27,9 |
| 26,2 | 27 | 27,6 | 29,2 | 30,4 | 29,4 | 28,4 | 27,4 | 26,6 |
| 25,6 | 26,9 | 26,7 | 27,8 | 28,8 | 28,1 | 27,3 | 26,7 | 25,7 |
| 25 | 25,4 | 25,8 | 26,4 | 26,9 | 26,6 | 26,1 | 25,6 | 25,2 |
| 24,5 | 24,7 | 25,1 | 25,4 | 25,5 | 25,3 | 25,3 | 24,6 | 24,6 |
| 24 | 24 | 24,1 | 24,2 | 24,4 | 24,3 | 24,2 | 24,1 | 24,1 |
| 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 120 минут после включения источника тепла | | | | | | | | |
| 30,3 | 34,5 | 39,3 | 51,5 | 64,2 | 51,3 | 40,2 | 34,9 | 31,1 |
| 29,6 | 32,6 | 36,1 | 43,2 | 51,5 | 43,7 | 37,3 | 33,9 | 30,6 |
| 29 | 31,1 | 33 | 36 | 39 | 36,5 | 34,2 | 31,9 | 29,7 |
| 27,8 | 29,2 | 30,6 | 32,8 | 34,8 | 32,5 | 31,7 | 29,5 | 28,3 |
| 26,5 | 27,3 | 28 | 29,3 | 30,4 | 29,6 | 28,8 | 27,7 | 26,8 |
| 25,7 | 26,4 | 26,8 | 27,7 | 28,7 | 28,1 | 27,4 | 26,9 | 25,7 |
| 25 | 25,3 | 25,5 | 26,1 | 26,6 | 26,3 | 25,8 | 25,5 | 25 |
| 24,5 | 24,7 | 24,9 | 25,3 | 25,5 | 25,2 | 25,1 | 24,3 | 24,6 |
| 23,9 | 23,9 | 24 | 24,2 | 24,4 | 24,3 | 24,2 | 24,1 | 24,1 |
| 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 135 минут после включения источника тепла | | | | | | | | |
| 30,6 | 35 | 39,8 | 51,8 | 64,2 | 51,7 | 40,5 | 35,3 | 31,2 |
| 29,8 | 34,8 | 40,3 | 45,6 | 51,8 | 44,1 | 37,5 | 34,1 | 30,7 |
| 29,1 | 31,2 | 33,2 | 36,4 | 39,6 | 36,9 | 34,4 | 32,1 | 30 |
| 27,9 | 29,4 | 30,8 | 33,1 | 35,2 | 33 | 31,9 | 29,9 | 28,6 |
| 26,7 | 27,5 | 28,2 | 29,5 | 30,7 | 29,9 | 29,1 | 28 | 27,1 |
| 25,9 | 26,6 | 27 | 27,8 | 28,7 | 28,2 | 27,6 | 27,1 | 26 |
| 25,2 | 25,5 | 25,7 | 26,1 | 26,6 | 26,3 | 26 | 25,7 | 25,2 |
| 24,6 | 24,8 | 25 | 25,3 | 25,5 | 25,3 | 25,2 | 24,5 | 24,7 |
| 23,9 | 24 | 24 | 24,2 | 24,4 | 24,3 | 24,2 | 24,1 | 24,1 |
| 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 150 минут после включения источника тепла | | | | | | | | |
| 30,9 | 35,5 | 40,3 | 52,1 | 64,1 | 52 | 40,8 | 35,7 | 31,3 |
| 30 | 37,1 | 44,4 | 48 | 52,1 | 44,6 | 37,7 | 34,3 | 30,9 |
| 29,1 | 31,3 | 33,4 | 36,7 | 40,2 | 37,3 | 34,5 | 32,3 | 30,2 |
| 28,1 | 29,6 | 31 | 33,4 | 35,6 | 33,5 | 32 | 30,2 | 28,9 |
| 26,9 | 27,8 | 28,5 | 29,8 | 30,9 | 30,2 | 29,4 | 28,3 | 27,4 |
| 26,2 | 26,8 | 27,2 | 28 | 28,7 | 28,3 | 27,9 | 27,2 | 26,2 |
| 25,4 | 25,6 | 25,8 | 26,2 | 26,5 | 26,4 | 26,2 | 25,8 | 25,4 |
| 24,7 | 24,9 | 25,1 | 25,3 | 25,5 | 25,3 | 25,3 | 24,8 | 24,8 |
| 24 | 24 | 24,1 | 24,2 | 24,4 | 24,3 | 24,2 | 24,1 | 24,1 |
| 24 | 24,1 | 24,1 | 24,1 | 24,1 | 24,1 | 24,1 | 24,1 | 24 |
| 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 165 минут после включения источника тепла | | | | | | | | |
| 31,1 | 35,9 | 40,8 | 52,4 | 64,1 | 52,4 | 41 | 36 | 31,3 |
| 30,1 | 39,3 | 48,6 | 50,3 | 52,4 | 45 | 37,9 | 34,4 | 31 |
| 29,2 | 31,4 | 33,6 | 37,1 | 40,7 | 37,7 | 34,7 | 32,5 | 30,5 |
| 28,2 | 29,7 | 31,2 | 33,6 | 36 | 33,9 | 32,2 | 30,6 | 29,1 |
| 27,1 | 28 | 28,7 | 30 | 31,2 | 30,5 | 29,7 | 28,6 | 27,6 |
| 26,4 | 26,9 | 27,4 | 28,1 | 28,7 | 28,4 | 28,1 | 27,4 | 26,5 |
| 25,5 | 25,8 | 26 | 26,2 | 26,5 | 26,4 | 26,3 | 26 | 25,5 |
| 24,8 | 25 | 25,1 | 25,3 | 25,4 | 25,4 | 25,3 | 25 | 24,8 |
| 24 | 24,1 | 24,1 | 24,2 | 24,3 | 24,3 | 24,2 | 24,1 | 24 |
| 24 | 24,1 | 24,1 | 24,1 | 24,1 | 24,1 | 24,1 | 24,1 | 24 |
| 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 180 минут после включения источника тепла | | | | | | | | |
| 31,4 | 36,4 | 41,3 | 52,7 | 64 | 52,7 | 41,3 | 36,4 | 31,4 |
| 30,3 | 41,5 | 52,7 | 52,7 | 52,7 | 45,4 | 38,1 | 34,6 | 31,1 |
| 29,2 | 31,5 | 33,8 | 37,4 | 41,3 | 38,1 | 34,8 | 32,7 | 30,7 |
| 28,3 | 29,9 | 31,4 | 33,9 | 36,4 | 34,4 | 32,3 | 30,9 | 29,4 |
| 27,3 | 28,2 | 28,9 | 30,2 | 31,4 | 30,8 | 30 | 28,9 | 27,9 |
| 26,6 | 27,1 | 27,6 | 28,2 | 28,7 | 28,5 | 28,3 | 27,5 | 26,7 |
| 25,7 | 25,9 | 26,1 | 26,2 | 26,4 | 26,4 | 26,5 | 26,1 | 25,7 |
| 24,9 | 25,1 | 25,2 | 25,3 | 25,4 | 25,4 | 25,4 | 25,2 | 24,9 |
| 24 | 24,1 | 24,1 | 24,2 | 24,3 | 24,3 | 24,2 | 24,1 | 24 |
| 24 | 24,1 | 24,1 | 24,1 | 24,1 | 24,1 | 24,1 | 24,1 | 24 |
| 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 195 минут после включения источника тепла | | | | | | | | |
| 31,1 | 36,1 | 41 | 52,7 | 64,4 | 52,7 | 41 | 36,1 | 31,1 |
| 30,2 | 39,5 | 48,8 | 50,8 | 52,7 | 45,4 | 38 | 34,5 | 31 |
| 29,3 | 31,6 | 33,9 | 37,3 | 41 | 38 | 34,9 | 32,8 | 30,7 |
| 28,3 | 29,9 | 31,4 | 33,8 | 36,1 | 34,3 | 32,4 | 30,9 | 29,3 |
| 27,2 | 28,1 | 28,8 | 30 | 31,1 | 30,6 | 30 | 28,9 | 27,9 |
| 26,5 | 27 | 27,5 | 28,1 | 28,6 | 28,5 | 28,3 | 28,8 | 29,2 |
| 25,7 | 25,9 | 26,1 | 26,2 | 26,4 | 26,4 | 26,5 | 26,1 | 25,7 |
| 24,9 | 25,1 | 25,2 | 25,3 | 25,5 | 25,4 | 25,4 | 25,2 | 24,9 |
| 24 | 24,1 | 24,1 | 24,3 | 24,4 | 24,4 | 24,3 | 24,2 | 24,1 |
| 24 | 24,1 | 24,1 | 24,1 | 24,2 | 24,2 | 24,1 | 24,1 | 24 |
| 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 210 минут после включения источника тепла | | | | | | | | |
| 30,9 | 35,8 | 40,7 | 52,8 | 64,8 | 52,8 | 40,7 | 35,8 | 30,9 |
| 30,2 | 37,6 | 44,9 | 48,9 | 52,8 | 45,4 | 37,9 | 34,4 | 30,9 |
| 29,5 | 31,7 | 33,9 | 37,3 | 40,7 | 37,9 | 35 | 32,9 | 30,8 |
| 28,4 | 29,9 | 31,4 | 33,6 | 35,8 | 34,2 | 32,5 | 31 | 29,3 |
| 27,2 | 28 | 28,7 | 29,8 | 30,9 | 30,5 | 30 | 28,9 | 27,9 |
| 26,5 | 27 | 27,5 | 28 | 28,5 | 28,4 | 28,3 | 30 | 31,7 |
| 25,6 | 25,9 | 26,1 | 26,2 | 26,4 | 26,4 | 26,4 | 26 | 25,7 |
| 24,9 | 25,1 | 25,2 | 25,4 | 25,5 | 25,5 | 25,4 | 25,2 | 25 |
| 24,1 | 24,1 | 24,2 | 24,3 | 24,5 | 24,4 | 24,3 | 24,2 | 24,1 |
| 24,1 | 24,1 | 24,1 | 24,2 | 24,2 | 24,2 | 24,2 | 24,2 | 24,1 |
| 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 225 минут после включения источника тепла | | | | | | | | |
| 30,6 | 35,5 | 40,4 | 52,8 | 65,1 | 52,8 | 40,4 | 35,5 | 30,6 |
| 30,1 | 35,6 | 41 | 46,9 | 52,8 | 45,3 | 37,8 | 34,3 | 30,7 |
| 29,6 | 31,7 | 34 | 37,2 | 40,4 | 37,8 | 35,1 | 32,9 | 30,8 |
| 28,4 | 29,9 | 31,3 | 33,5 | 35,5 | 34,1 | 32,6 | 31 | 29,2 |
| 27,1 | 27,9 | 28,6 | 29,6 | 30,6 | 30,3 | 30 | 28,9 | 27,8 |
| 26,4 | 26,9 | 27,4 | 27,9 | 28,4 | 28,4 | 28,2 | 31,3 | 26,7 |
| 25,6 | 25,8 | 26 | 26,2 | 26,4 | 26,3 | 26,4 | 26 | 25,6 |
| 24,9 | 25 | 25,1 | 25,4 | 25,6 | 25,5 | 25,3 | 25,2 | 25 |
| 24,1 | 24,1 | 24,2 | 24,4 | 24,5 | 24,5 | 24,4 | 24,3 | 24,2 |
| 24,1 | 24,1 | 24,1 | 24,2 | 24,3 | 24,3 | 24,2 | 24,2 | 24,1 |
| 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 240 минут после включения источника тепла | | | | | | | | |
| 30,3 | 35,2 | 40,1 | 52,8 | 65,5 | 52,8 | 40,1 | 35,2 | 30,3 |
| 30 | 33,6 | 37,1 | 45 | 52,8 | 45,3 | 37,7 | 34,2 | 30,6 |
| 29,7 | 31,8 | 34 | 37,1 | 40,1 | 37,7 | 35,2 | 33 | 30,8 |
| 28,4 | 29,9 | 31,3 | 33,3 | 35,2 | 34 | 32,7 | 31 | 29,1 |
| 27 | 27,8 | 28,5 | 29,4 | 30,3 | 30,1 | 30 | 28,9 | 27,8 |
| 26,3 | 26,8 | 27,3 | 27,8 | 28,3 | 28,3 | 28,2 | 32,5 | 36,7 |
| 25,5 | 25,8 | 26 | 26,2 | 26,4 | 26,3 | 26,3 | 25,9 | 25,6 |
| 24,9 | 25 | 25,1 | 25,4 | 25,6 | 25,5 | 25,3 | 25,2 | 25 |
| 24,1 | 24,1 | 24,2 | 24,4 | 24,6 | 24,5 | 24,4 | 24,3 | 24,2 |
| 24,1 | 24,1 | 24,1 | 24,2 | 24,3 | 24,3 | 24,2 | 24,2 | 24,1 |
| 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |

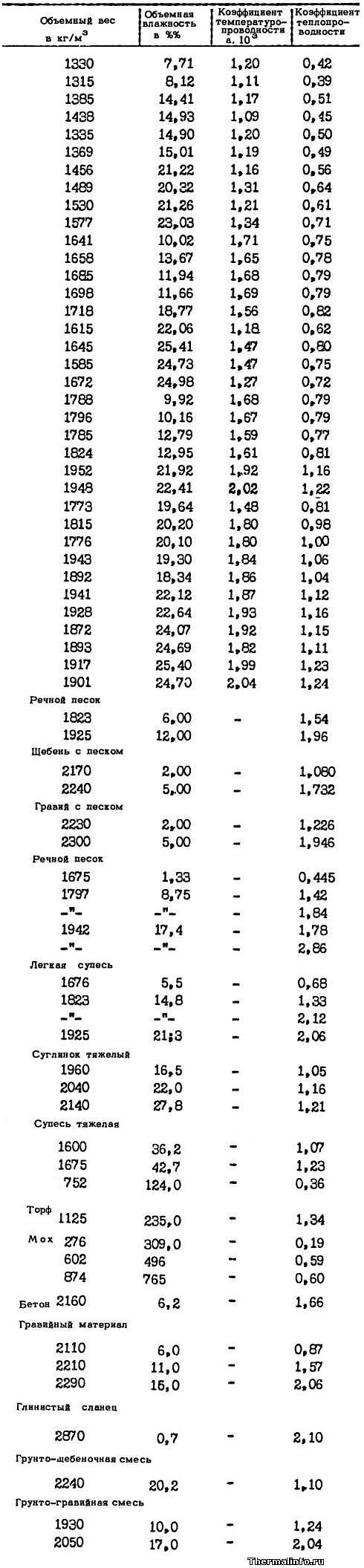
Во второй серии в песок комнатной температуры было добавлено около 2 литров воды, было произведено тщательное размешивание песка, после чего температура песка составила 23 ℃, был включен паяльник. Данные измерений температуры для влажного песка представлены в таблице 3.2.2. Поле распределение температуры для сухого песка приведено в приложении В.

Таблица 3.2.2.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 0 минут после включения источника тепла | | | | | | | | |
| 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 15 минут после включения источника тепла | | | | | | | | |
| 24,4 | 25,2 | 26,1 | 29,1 | 32 | 29,1 | 26,1 | 25,2 | 24,4 |
| 24,5 | 25 | 25,6 | 27,3 | 29,1 | 27,5 | 25,8 | 25,2 | 24,5 |
| 24,5 | 24,8 | 25,1 | 25,6 | 26,1 | 25,8 | 25,6 | 25,1 | 24,6 |
| 24,6 | 24,7 | 24,7 | 25 | 25,2 | 25,1 | 24,9 | 24,6 | 24,3 |
| 24,8 | 24,5 | 24,3 | 24,3 | 24,4 | 24,3 | 24,3 | 24,2 | 24 |
| 24,4 | 24,2 | 24,1 | 24,2 | 24,2 | 24,2 | 24,1 | 24,1 | 24,1 |
| 23,9 | 23,9 | 23,9 | 24 | 24 | 24 | 23,9 | 23,9 | 23,9 |
| 23,9 | 23,9 | 23,9 | 23,9 | 23,9 | 23,9 | 23,9 | 23,9 | 23,9 |
| 23,8 | 23,8 | 23,8 | 23,8 | 23,8 | 23,8 | 23,8 | 23,8 | 23,8 |
| 23,7 | 23,7 | 23,7 | 23,7 | 23,7 | 23,7 | 23,7 | 23,7 | 23,7 |
| 23,6 | 23,6 | 23,6 | 23,6 | 23,6 | 23,6 | 23,6 | 23,6 | 23,6 |
| 30 минут после включения источника тепла | | | | | | | | |
| 24,8 | 26,5 | 28,2 | 34,1 | 40 | 34,1 | 28,2 | 26,5 | 24,8 |
| 24,9 | 26,1 | 27,2 | 30,7 | 34,1 | 30,9 | 27,7 | 26,4 | 25 |
| 25 | 25,6 | 26,1 | 27,2 | 28,2 | 27,7 | 27,1 | 26,2 | 25,3 |
| 25,3 | 25,3 | 25,3 | 25,9 | 26,5 | 26,2 | 25,8 | 25,3 | 24,7 |
| 25,5 | 25 | 24,5 | 24,7 | 24,8 | 24,7 | 24,5 | 24,3 | 24,1 |
| 24,7 | 24,5 | 24,2 | 24,3 | 24,4 | 24,3 | 24,2 | 24,2 | 24,2 |
| 23,9 | 23,9 | 23,9 | 23,9 | 23,9 | 23,9 | 23,9 | 23,9 | 23,9 |
| 23,8 | 23,8 | 23,8 | 23,8 | 23,8 | 23,8 | 23,8 | 23,8 | 23,8 |
| 23,6 | 23,6 | 23,6 | 23,6 | 23,6 | 23,6 | 23,6 | 23,6 | 23,6 |
| 23,5 | 23,5 | 23,5 | 23,5 | 23,5 | 23,5 | 23,5 | 23,5 | 23,5 |
| 23,4 | 23,4 | 23,4 | 23,4 | 23,4 | 23,4 | 23,4 | 23,4 | 23,4 |
| 45 минут после включения источника тепла | | | | | | | | |
| 25,1 | 27,7 | 30,2 | 39,2 | 48 | 39,2 | 30,2 | 27,7 | 25,1 |
| 25,4 | 27,1 | 28,7 | 34 | 39,2 | 34,4 | 29,5 | 27,5 | 25,5 |
| 25,5 | 26,3 | 27,2 | 28,7 | 30,2 | 29,5 | 28,7 | 27,3 | 25,9 |
| 25,9 | 26 | 26 | 26,9 | 27,7 | 27,2 | 26,7 | 25,9 | 25 |
| 26,3 | 25,5 | 24,8 | 25 | 25,1 | 25 | 24,8 | 24,5 | 24,1 |
| 25,1 | 24,7 | 24,3 | 24,5 | 24,5 | 24,5 | 24,3 | 24,3 | 24,2 |
| 23,8 | 23,8 | 23,8 | 23,9 | 23,9 | 23,9 | 23,8 | 23,8 | 23,8 |
| 23,6 | 23,6 | 23,6 | 23,6 | 23,6 | 23,6 | 23,6 | 23,6 | 23,6 |
| 23,4 | 23,4 | 23,4 | 23,4 | 23,4 | 23,4 | 23,4 | 23,4 | 23,4 |
| 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 60 минут после включения источника тепла | | | | | | | | |
| 25,5 | 28,9 | 32,3 | 44,2 | 56 | 44,2 | 32,3 | 28,9 | 25,5 |
| 25,8 | 28,1 | 30,3 | 37,3 | 44,2 | 37,8 | 31,3 | 28,7 | 26 |
| 26 | 27,1 | 28,2 | 30,3 | 32,3 | 31,3 | 30,2 | 28,4 | 26,5 |
| 26,5 | 26,6 | 26,6 | 27,8 | 28,9 | 28,3 | 27,6 | 26,5 | 25,3 |
| 27 | 26 | 25 | 25,3 | 25,5 | 25,3 | 25 | 24,6 | 24,1 |
| 25,4 | 24,9 | 24,4 | 24,6 | 24,7 | 24,6 | 24,4 | 24,4 | 24,3 |
| 23,7 | 23,7 | 23,7 | 23,8 | 23,8 | 23,8 | 23,7 | 23,7 | 23,7 |
| 23,5 | 23,5 | 23,5 | 23,5 | 23,5 | 23,5 | 23,5 | 23,5 | 23,5 |
| 23,2 | 23,2 | 23,2 | 23,2 | 23,2 | 23,2 | 23,2 | 23,2 | 23,2 |
| 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 75 минут после включения источника тепла | | | | | | | | |
| 25,9 | 29,3 | 32,7 | 44,8 | 56,7 | 44,8 | 32,7 | 29,3 | 25,9 |
| 26 | 28,5 | 30,8 | 37,8 | 44,8 | 38,3 | 31,7 | 29,1 | 26,4 |
| 26,1 | 27,5 | 28,8 | 30,8 | 32,7 | 31,7 | 30,5 | 28,8 | 26,9 |
| 26,4 | 26,8 | 27,1 | 28,2 | 29,3 | 28,7 | 27,9 | 26,9 | 25,7 |
| 26,6 | 26 | 25,3 | 25,7 | 25,9 | 25,7 | 25,3 | 25 | 24,5 |
| 25,3 | 25 | 24,6 | 24,8 | 25 | 24,8 | 24,6 | 24,6 | 24,4 |
| 23,8 | 23,8 | 23,8 | 23,9 | 24 | 23,9 | 23,8 | 23,8 | 23,8 |
| 23,6 | 23,6 | 23,6 | 23,6 | 23,6 | 23,6 | 23,5 | 23,5 | 23,5 |
| 23,3 | 23,3 | 23,2 | 23,2 | 23,2 | 23,2 | 23,2 | 23,2 | 23,2 |
| 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 90 минут после включения источника тепла | | | | | | | | |
| 26,3 | 29,7 | 33,2 | 45,3 | 57,4 | 45,3 | 33,2 | 29,7 | 26,3 |
| 26,3 | 28,8 | 31,3 | 38,4 | 45,3 | 38,7 | 32,1 | 29,5 | 26,8 |
| 26,2 | 27,8 | 29,4 | 31,3 | 33,2 | 32,1 | 30,9 | 29,1 | 27,3 |
| 26,2 | 26,9 | 27,6 | 28,7 | 29,7 | 29 | 28,3 | 27,2 | 26,1 |
| 26,3 | 26 | 25,7 | 26 | 26,3 | 26 | 25,7 | 25,3 | 24,9 |
| 25,1 | 25 | 24,9 | 25,1 | 25,2 | 25,1 | 24,8 | 24,7 | 24,6 |
| 23,9 | 24 | 24 | 24,1 | 24,1 | 24 | 23,9 | 23,9 | 23,9 |
| 23,7 | 23,7 | 23,7 | 23,7 | 23,7 | 23,7 | 23,6 | 23,6 | 23,6 |
| 23,4 | 23,3 | 23,3 | 23,3 | 23,3 | 23,2 | 23,2 | 23,2 | 23,2 |
| 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 105 минут после включения источника тепла | | | | | | | | |
| 26,6 | 30,1 | 33,6 | 45,9 | 58,1 | 45,9 | 33,6 | 30,1 | 26,6 |
| 26,5 | 29,2 | 31,8 | 38,9 | 45,9 | 39,2 | 32,4 | 29,8 | 27,1 |
| 26,2 | 28,2 | 30 | 31,8 | 33,6 | 32,4 | 31,2 | 29,5 | 27,6 |
| 26,1 | 27,1 | 28 | 29,1 | 30,1 | 29,4 | 28,6 | 27,6 | 26,4 |
| 25,9 | 25,9 | 26 | 26,4 | 26,6 | 26,4 | 26 | 25,7 | 25,2 |
| 25 | 25,1 | 25,1 | 25,3 | 25,5 | 25,3 | 25 | 24,9 | 24,7 |
| 24 | 24,1 | 24,1 | 24,2 | 24,3 | 24,1 | 23,9 | 23,9 | 23,9 |
| 23,7 | 23,7 | 23,7 | 23,8 | 23,8 | 23,7 | 23,6 | 23,6 | 23,6 |
| 23,4 | 23,4 | 23,3 | 23,3 | 23,3 | 23,2 | 23,1 | 23,2 | 23,2 |
| 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 120 минут после включения источника тепла | | | | | | | | |
| 27 | 30,5 | 34 | 46,4 | 58,8 | 46,4 | 34 | 30,5 | 27 |
| 26,7 | 29,5 | 32,3 | 39,4 | 46,4 | 39,6 | 32,8 | 30,2 | 27,5 |
| 26,3 | 28,5 | 30,6 | 32,3 | 34 | 32,8 | 31,5 | 29,8 | 28 |
| 25,9 | 27,2 | 28,5 | 29,5 | 30,5 | 29,7 | 28,9 | 27,9 | 26,8 |
| 25,5 | 25,9 | 26,3 | 26,7 | 27 | 26,7 | 26,3 | 26 | 25,6 |
| 24,8 | 25,1 | 25,3 | 25,5 | 25,7 | 25,5 | 25,2 | 25 | 24,8 |
| 24,1 | 24,2 | 24,2 | 24,3 | 24,4 | 24,2 | 24 | 24 | 24 |
| 23,8 | 23,8 | 23,8 | 23,9 | 23,9 | 23,8 | 23,6 | 23,6 | 23,6 |
| 23,5 | 23,4 | 23,3 | 23,3 | 23,3 | 23,2 | 23,1 | 23,2 | 23,2 |
| 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 135 минут после включения источника тепла | | | | | | | | |
| 27,1 | 30,6 | 34 | 47,1 | 60,1 | 47,1 | 34 | 30,6 | 27,1 |
| 27 | 29,7 | 32,3 | 39,7 | 47,1 | 40 | 32,8 | 30,3 | 27,6 |
| 26,9 | 28,8 | 30,6 | 32,3 | 34 | 32,8 | 31,6 | 29,9 | 28,1 |
| 26,2 | 27,4 | 28,5 | 29,6 | 30,6 | 29,8 | 29 | 28 | 26,9 |
| 25,6 | 26 | 26,4 | 26,8 | 27,1 | 26,8 | 26,4 | 26,1 | 25,6 |
| 24,8 | 25,1 | 25,3 | 25,5 | 25,7 | 25,5 | 25,2 | 25 | 24,8 |
| 24,1 | 24,2 | 24,2 | 24,3 | 24,4 | 24,2 | 24 | 24 | 24 |
| 23,8 | 23,8 | 23,7 | 23,8 | 23,8 | 23,7 | 23,6 | 23,6 | 23,5 |
| 23,4 | 23,3 | 23,2 | 23,2 | 23,2 | 23,2 | 23,1 | 23,1 | 23,1 |
| 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 150 минут после включения источника тепла | | | | | | | | |
| 27,2 | 30,6 | 34 | 47,7 | 61,4 | 47,7 | 34 | 30,6 | 27,2 |
| 27,4 | 29,9 | 32,3 | 40,1 | 47,7 | 40,3 | 32,9 | 30,3 | 27,7 |
| 27,5 | 29,1 | 30,6 | 32,3 | 34 | 32,9 | 31,7 | 30 | 28,2 |
| 26,6 | 27,6 | 28,6 | 29,6 | 30,6 | 29,9 | 29,1 | 28,1 | 27 |
| 25,7 | 26,1 | 26,5 | 26,9 | 27,2 | 26,9 | 26,6 | 26,2 | 25,7 |
| 24,9 | 25,2 | 25,4 | 25,6 | 25,8 | 25,6 | 25,3 | 25,1 | 24,8 |
| 24,1 | 24,1 | 24,1 | 24,2 | 24,3 | 24,1 | 23,9 | 23,9 | 23,9 |
| 23,7 | 23,7 | 23,7 | 23,8 | 23,8 | 23,7 | 23,5 | 23,5 | 23,5 |
| 23,4 | 23,3 | 23,1 | 23,2 | 23,2 | 23,1 | 23 | 23,1 | 23 |
| 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 165 минут после включения источника тепла | | | | | | | | |
| 27,2 | 30,7 | 34 | 48,4 | 62,7 | 48,4 | 34 | 30,7 | 27,2 |
| 27,7 | 30 | 32,3 | 40,4 | 48,4 | 40,7 | 32,9 | 30,4 | 27,8 |
| 28 | 29,3 | 30,5 | 32,3 | 34 | 32,9 | 31,7 | 30 | 28,3 |
| 26,9 | 27,7 | 28,6 | 29,7 | 30,7 | 29,9 | 29,2 | 28,1 | 27 |
| 25,7 | 26,2 | 26,6 | 26,9 | 27,2 | 27 | 26,7 | 26,2 | 25,7 |
| 24,9 | 25,2 | 25,4 | 25,6 | 25,8 | 25,6 | 25,3 | 25,1 | 24,8 |
| 24 | 24,1 | 24,1 | 24,2 | 24,3 | 24,1 | 23,9 | 23,9 | 23,9 |
| 23,7 | 23,7 | 23,6 | 23,7 | 23,7 | 23,6 | 23,5 | 23,5 | 23,4 |
| 23,3 | 23,2 | 23 | 23,1 | 23,1 | 23,1 | 23 | 23 | 22,9 |
| 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 180 минут после включения источника тепла | | | | | | | | |
| 27,3 | 30,7 | 34 | 49 | 64 | 49 | 34 | 30,7 | 27,3 |
| 28 | 30,2 | 32,3 | 40,7 | 49 | 41 | 32,9 | 30,4 | 27,9 |
| 28,6 | 29,6 | 30,5 | 32,3 | 34 | 32,9 | 31,8 | 30,1 | 28,4 |
| 27,2 | 27,9 | 28,6 | 29,7 | 30,7 | 30 | 29,3 | 28,2 | 27,1 |
| 25,8 | 26,3 | 26,7 | 27 | 27,3 | 27,1 | 26,8 | 26,3 | 25,7 |
| 24,9 | 25,2 | 25,4 | 25,6 | 25,8 | 25,6 | 25,3 | 25,1 | 24,8 |
| 24 | 24 | 24 | 24,1 | 24,2 | 24 | 23,8 | 23,8 | 23,8 |
| 23,6 | 23,6 | 23,5 | 23,6 | 23,6 | 23,5 | 23,4 | 23,4 | 23,3 |
| 23,2 | 23,1 | 22,9 | 23 | 23 | 23 | 22,9 | 22,9 | 22,8 |
| 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 195 минут после включения источника тепла | | | | | | | | |
| 27,4 | 30,8 | 34,1 | 49,2 | 64,3 | 49,2 | 34,1 | 30,8 | 27,4 |
| 28 | 30,2 | 32,4 | 40,8 | 49,2 | 41,1 | 32,9 | 30,4 | 27,9 |
| 28,6 | 29,6 | 30,6 | 32,4 | 34,1 | 32,9 | 31,7 | 30,1 | 28,4 |
| 27,2 | 28 | 28,7 | 29,8 | 30,8 | 30 | 29,3 | 28,2 | 27,1 |
| 25,8 | 26,3 | 26,7 | 27,1 | 27,4 | 27,1 | 26,8 | 26,3 | 25,7 |
| 24,9 | 25,2 | 25,4 | 25,6 | 25,8 | 25,6 | 25,3 | 25,1 | 24,8 |
| 24 | 24 | 24 | 24,1 | 24,2 | 24 | 23,8 | 23,8 | 23,8 |
| 23,6 | 23,6 | 23,5 | 23,6 | 23,6 | 23,5 | 23,4 | 23,4 | 23,3 |
| 23,2 | 23,1 | 22,9 | 23 | 23 | 23 | 22,9 | 22,9 | 22,8 |
| 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 210 минут после включения источника тепла | | | | | | | | |
| 27,4 | 30,8 | 34,2 | 49,4 | 64,5 | 49,4 | 34,2 | 30,8 | 27,4 |
| 28,1 | 30,3 | 32,4 | 40,9 | 49,4 | 41,2 | 32,9 | 30,5 | 28 |
| 28,7 | 29,7 | 30,6 | 32,4 | 34,2 | 32,9 | 31,7 | 30,1 | 28,5 |
| 27,3 | 28 | 28,7 | 29,8 | 30,8 | 30 | 29,2 | 28,2 | 27,1 |
| 25,9 | 26,4 | 26,8 | 27,1 | 27,4 | 27,1 | 26,8 | 26,3 | 25,7 |
| 25 | 25,3 | 25,5 | 25,7 | 25,9 | 25,6 | 25,3 | 25,1 | 24,8 |
| 24 | 24,1 | 24,1 | 24,2 | 24,2 | 24,1 | 23,9 | 23,9 | 23,8 |
| 23,6 | 23,6 | 23,6 | 23,6 | 23,6 | 23,5 | 23,4 | 23,4 | 23,3 |
| 23,2 | 23,1 | 23 | 23 | 23 | 23 | 22,9 | 22,9 | 22,8 |
| 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 225 минут после включения источника тепла | | | | | | | | |
| 27,5 | 30,9 | 34,2 | 49,5 | 64,8 | 49,5 | 34,2 | 30,9 | 27,5 |
| 28,1 | 30,3 | 32,5 | 41 | 49,5 | 41,2 | 32,9 | 30,5 | 28 |
| 28,7 | 29,7 | 30,7 | 32,5 | 34,2 | 32,9 | 31,6 | 30 | 28,5 |
| 27,3 | 28,1 | 28,8 | 29,9 | 30,9 | 30 | 29,2 | 28,1 | 27,1 |
| 25,9 | 26,4 | 26,8 | 27,2 | 27,5 | 27,1 | 26,7 | 26,2 | 25,7 |
| 25 | 25,3 | 25,5 | 25,7 | 25,9 | 25,6 | 25,3 | 25,1 | 24,8 |
| 24 | 24,1 | 24,1 | 24,2 | 24,2 | 24,1 | 23,9 | 23,9 | 23,8 |
| 23,6 | 23,6 | 23,6 | 23,6 | 23,6 | 23,5 | 23,4 | 23,4 | 23,3 |
| 23,1 | 23,1 | 23 | 23 | 23 | 23 | 22,9 | 22,8 | 22,7 |
| 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 240 минут после включения источника тепла | | | | | | | | |
| 27,5 | 30,9 | 34,3 | 49,7 | 65 | 49,7 | 34,3 | 30,9 | 27,5 |
| 28,1 | 30,3 | 32,5 | 41,1 | 49,7 | 41,3 | 32,9 | 30,5 | 28 |
| 28,7 | 29,7 | 30,7 | 32,5 | 34,3 | 32,9 | 31,5 | 30 | 28,5 |
| 27,3 | 28,1 | 28,8 | 29,9 | 30,9 | 30 | 29,1 | 28,1 | 27,1 |
| 25,9 | 26,4 | 26,8 | 27,2 | 27,5 | 27,1 | 26,7 | 26,2 | 25,7 |
| 25 | 25,3 | 25,5 | 25,7 | 25,9 | 25,6 | 25,3 | 25,1 | 24,8 |
| 24 | 24,1 | 24,1 | 24,2 | 24,2 | 24,1 | 23,9 | 23,9 | 23,8 |
| 23,6 | 23,6 | 23,6 | 23,6 | 23,6 | 23,5 | 23,4 | 23,4 | 23,3 |
| 23,1 | 23,1 | 23 | 23 | 23 | 23 | 22,9 | 22,8 | 22,7 |
| 23,6 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |

Так же были измерены массы сухого и мокрого песка заданного объема для вычисления открытой пористости, влажности и плотности песка без пор. В шприц был насыпан песок до отметки 10 мл и взвешен на весах. После этого в шприц было залито большое количество воды для того, чтобы все поры в песке заполнились ею. Затем лишняя вода была выдавлена поршнем шприца. Таким образом в песке осталась только та вода, которая заполняет открытые поры. После этого так же была измерена масса уже мокрого песка. Открытая пористость песка, являющаяся объемом всех пор, сообщающихся между собой в среде, вычисляется таким образом: mв=mм-mс, где mв – масса воды, заполняющая поры песка, mс – масса сухого песка, объемом 10 мл, которая равна 14,14 г, mм – масса мокрого песка, объемом 10 мл, которая равна 19,47. mв=5,33 г, очевидно, что объем воды Vв, заполняющей поры песка равен 5,33 мл. Долю воды, заполняющей поры песка можно вычислить по формуле , следовательно объемная доля воды, заполняющей поры песка равна 53,3%, что является влажностью песка. Таким образом открытая пористость песка равна 53,3%. Плотность сухого и мокрого песка можно взять из таблицы теплопроводности и плотность песка (табл. 3.2.3)

Таблица 3.2.3.



Размерности в табл. 3.2.3: теплопроводность ккал/(м·час·град), температуропроводность песка м2/час, плотность песка в кг/м3 в зависимости от влажности при комнатной температуре. Плотность сухого песка по формуле ρ= равна 1414 кг/м3, а мокрого 1947 кг/м3. Плотность можно приравнять к объемному весу, так как измерения объемов проводились с помощью шприца так, что что поршень шприца сильно сдавливал песок и вытеснял лишний объем воды или воздуха из пор песка. Таким образом температуропроводность и теплопроводность для сухого и мокрого песка равны 0,325 м2/с, 0,6978 Вт/(м·K) и 0,52 м2/с, 0,13956 Вт/(м·K) соответственно. Плотность песка без пор можно вычислить по формуле ρп=mс/Vп, где Vп – объем песка без пор, равный, очевидно, 4,67 мл. Плотность песка без пор, используемого в эксперименте равна 3,028 г/см3, что близко к плотности кварца (2,6 г/см3), из которого, в основном и состоит песок.

**3.3. Анализ экспериментальных данных**

Из графиков для сухого песка в приложении Г видно, что с 60 минуты после включения источника тепла скорость роста температуры в точках заметно снизилась. Можно сделать вывод, что после 60 минуты после включения источника тепла установился стационарный режим. Так же после 60 минуты распространение тепла продолжалось на большее расстояние, чем в эксперименте с мокрым песком.

Как видно из графиков для мокрого песка в приложении Г, с 60 минуты после включения источника тепла температура так же меняется не так быстро, как в первые 60 минут, что так же можно считать установлением стационарного режима, однако температура вблизи источника (0 – 10 см) продолжала расти, в сравнение сухим песком. Это можно объяснить тем, что в мокром песке у воды, заполняющей поры теплоемкость намного больше, чем у воздуха, заполняющего поры сухого песка. Так же испарение воды с поверхности песка и конвекция воды в толще песка играет в этом процессе достаточно большую роль.

Для расчета теплового потока и температурного градиента используется формула (2.13) с такими изменениями, что z1 и z2 – расстояние от источника, а Vz=0, так как конвекцией в двухмерном случае можно пренебречь. Таким образом формула теплового потока имеет следующий вид:

где

Значения температурного градиента, теплового потока и графики их зависимостей от расстояния приведены в приложении Д.

**Заключение**

В данной выпускной квалификационной работе было проведено физическое моделирование процесса термометрии скважин. Важность и актуальность данной работы заключается в том, что, как геотермические исследования, так и термометрия скважин в частности может быть полезна для контроля качества, технического состояния и условий работы месторождений углеводородов, и, особо важна при проведении тепловых методов увеличения нефтеотдачи, таких как: паротепловое воздействие на пласт; внутрипластовое горение; вытеснение нефти горячей водой; пароциклические обработки скважин. Так же термометрия скважин необходима при использовании нового и перспективного метода разогрева нефтяного пласта электромагнитным излучением СВЧ-диапазона.

Как показали эксперименты, для достоверности результатов в подобном моделировании стоит использовать чистый песок без камней и примесей для достижения однородности среды.

**Список литературы**

1. Temperature penetration [Электронный ресурс]. URL: <http://mirznanii.com/info/>opredelenie-geotermii-gornogo-massiva\_24005   
2. Теплопроводность массива [Электронный ресурс]. URL: http://www.mining-[enc.ru/g/geotermiya](http://enc.ru/g/geotermiya)  
3. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. М., 1977. 344 с.  
4. Теплопроводность-Температура [Электронный ресурс]. URL: http://dssp.  
petrsu.[ru/p/tutorial/ftt/Part6/part6\_5.htm](http://ru/p/tutorial/ftt/Part6/part6_5.htm)  
5. Кварц [Электронный ресурс]. URL: <http://phys-bsu.narod.ru/lib/ftt/ftt/408.htm>  
6. Цветков Ф. Ф., Григорьев Б. А. Тепломассообмен : учеб. пособие для вузов. М., 2005. 550 с.  
7. Rubie D. C., Nimmo F., Melosh H. J. Formation of Earth’s Core [Электронный ре- сурс]. Ch. 9.03. Elsevier 2007. URL: <http://es.ucsc.edu/~fnimmo/website/treatise3.pdf>  
8. Разрез Земли [Электронный ресурс]. URL: <http://ours-n-ture.ru/b/book/11/>page/4-3-vnutrennee-stroenie-i-relef-zemli/33-16-vnutrennee-stroenie-zemli   
9. Добрынин В. М., Вендельштейн Б. Ю., Кожевников Д. А. Петрофизика (Физи- ка горных пород) : учеб. для вузов / под ред. Д. А. Кожевникова М., 2004. 368 с.  
10. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика / под ред. Н. Б. Дортман. 2-е изд., перераб. и доп. М., 1984. 455 с.  
12. Левашкевич В. Г. Геотермия запада Восточно-Европейской платформы. Минск, 2013. 154 с.  
14. Пирсон Г. Л., Беккер Дж. А., Грин С. Б. Свойства и применения термисторов термически чувствительных сопротивлений // Успехи физ. наук. 1951. Т. XLV, вып. 2. С 229–276.  
15. Кутасов И. М. Уточнение зависимости сопротивления термисторов от тем- пературы // Тепло- и массообмен в мерзлых почвах и горных породах. М., 1961. С. 144.  
18. Богомолов Г. В., Цыбуля Л. А., Атрощенко П. П. Геотермическая зональность территории БССР. Минск, 1972. 216 с.  
19. Хуторской М. Д. Введение в геотермию. М., 1996. 156 с.