

# Физика горных пород

Лекция 8 – Тепловые свойства горных пород

Лектор: Шульгин Павел Николаевич

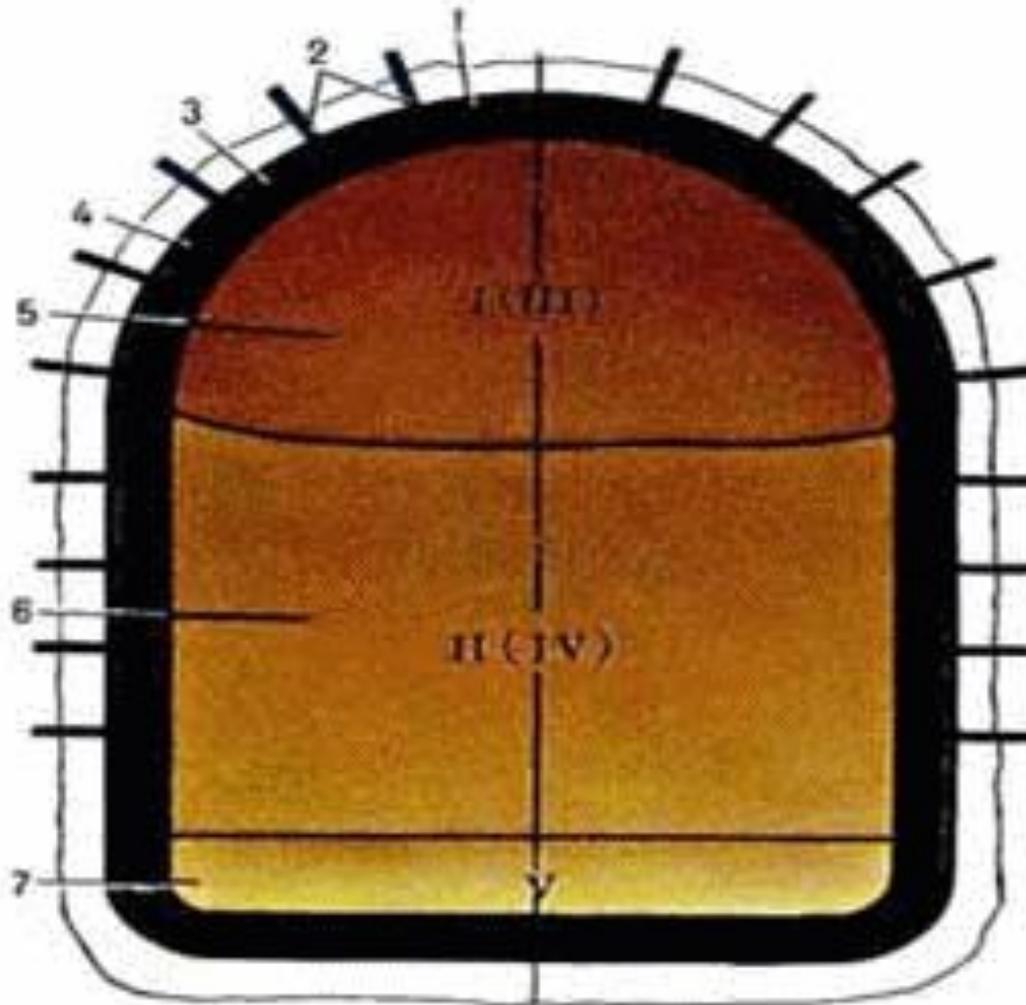
<http://do.dstu.education>

<http://sggs-donstu.ucoz.ru/>

- Гидравлические и газодинамические свойства вмещающих пород приобретают решающую роль при разработке **нефтяных и газовых скважин.**
- Нашло применение на шахтах **ослабление** угольного массива нагнетанием воды в пласт под давлением. В этом случае усиливается влияние некоторых гидравлических свойств - **водопроницаемости, смачиваемости, влагоемкости.**

- **Упрочнение пород** также связано с гидравлическими свойствами горных пород. В этом случае **нагнетают** различные растворы: цемент, гидрогель кремневой кислоты, битум, смолы и др. Частицы скрепляющего вещества, проникая в поры горной породы, закупоривают их, цементируя воедино зерна и повышая общую прочность породы, *снижая при этом водопроницаемость.*

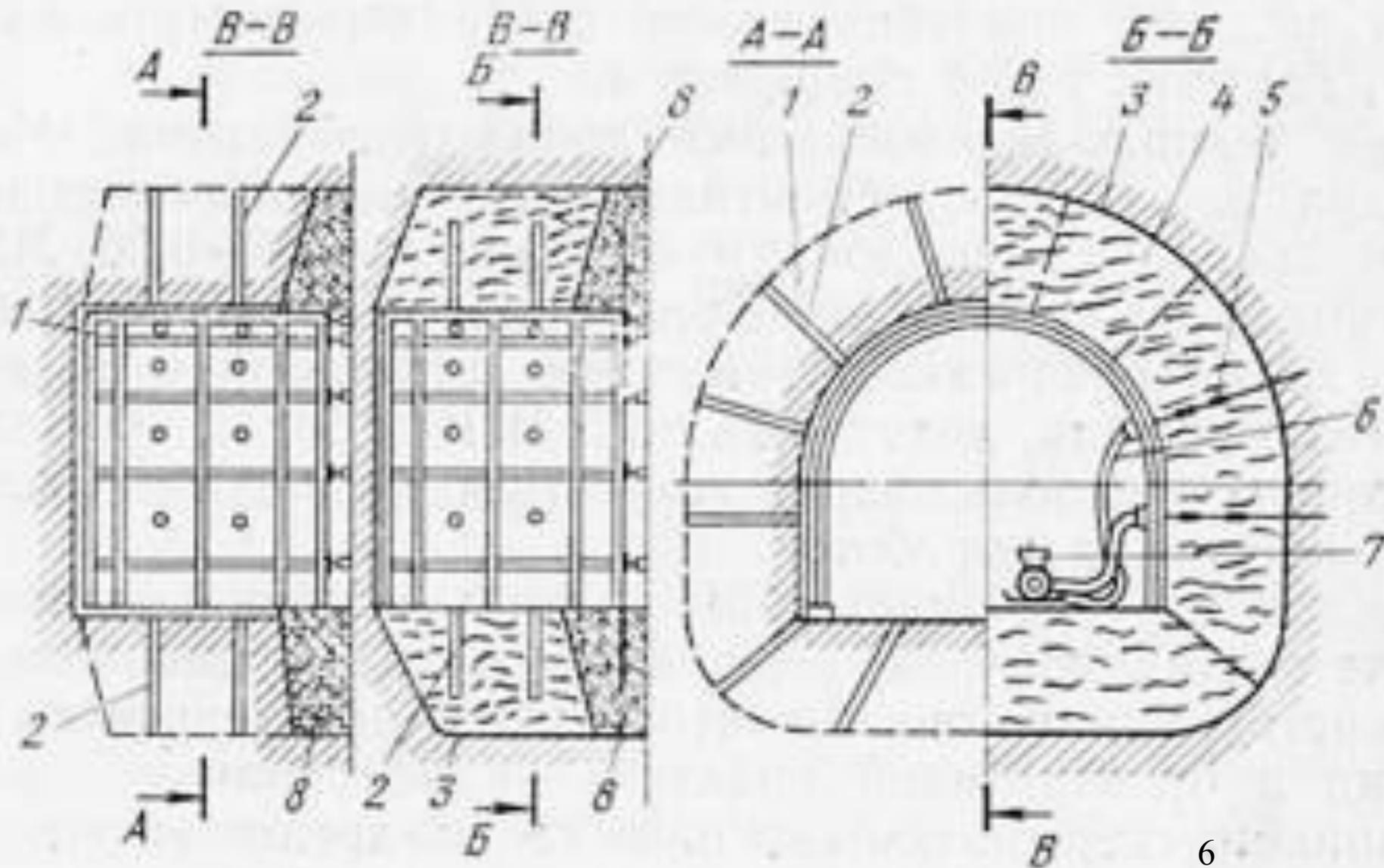
# Схема создания набрызгбетонной крепи



# Борьба с пучением способом АРПУ



# Породонесущая крепь «Монолит»



# ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

- Современные рудники достигли глубин около 3-3,5 км (Южная Африка, Индия), а их владельцы считают возможным продолжать горные работы на глубине до 5000 м.
- Глубина горных работ на шахтах Донбасса достигла 1300 м. Геотермическая ступень для этого угольного месторождения равна 38 м/град.К., что приводит к повышению температуры пород.
- Поэтому, тепловые свойства горных пород имеют большое значение в горном деле.



### **Шахта «Тау-Тона», глубина 5000 м**

Таутона расположена в 50 км к юго-западу от Йоханнесбурга, между городами Вестонария и Фандербейлпарк. Название Таутона (Тау-Тона) на языке суто означает «великий лев». Работает более 35 000 человек

### **Шахта «Витватерсранд», глубина более 4500 м**



**Шахта «Шахтёрская — Глубокая»,  
глубина 1546 м**



**Шахта «Гвардейская», глубина 1430 м**

Шахта по добыче железной руды в городе  
Кривом Роге

## Шахта «Прогресс», глубина 1340 м



Угледобывающее предприятие в городе  
Торез

## Шахта им. Скочинского, глубина 1200 м



**Шахта им. В.М. Бажанова,  
глубина 1200 м**



угледобывающее  
предприятие в г. Макеевка

Сегодня шахта работает  
на глубинах порядка  
1100 метров и является самой  
глубокой шахтой России.

**Шахта  
«Комсомольская»,  
глубина 1200 м**





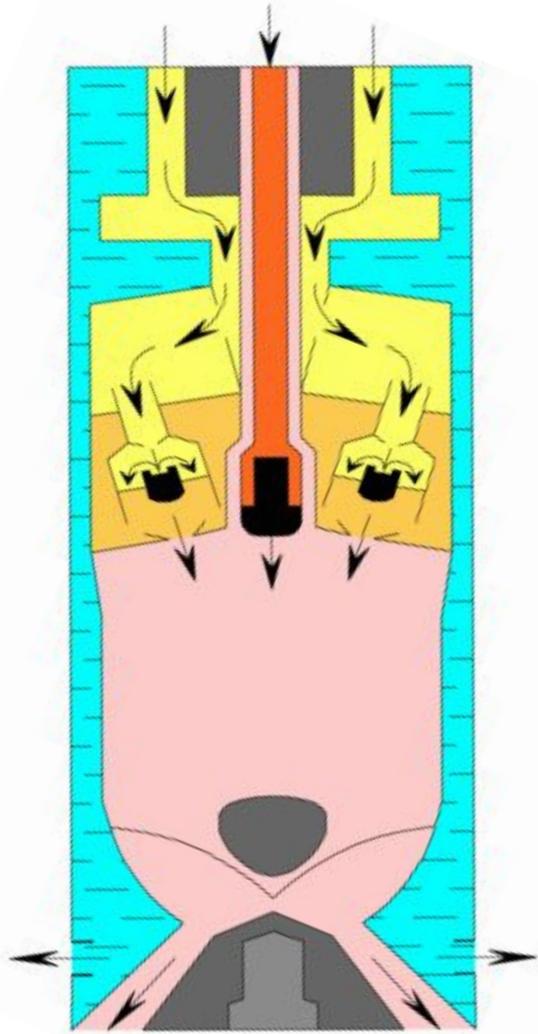
- «Черемуховская-Глубокая» Североуральский бокситовый рудник (СУБР).
- «Черемуховская-Глубокая» стала самой глубокой в России (1550 метров) и вошла в пятерку наиболее глубоких шахт мира.

- Высокая температура горных пород предъявляет специальные требования к проветриванию пройденных в них горных выработок.
- Прочность горных пород с повышением температуры, как правило, **снижается**; повышается частота проявления горных ударов и внезапных выбросов.

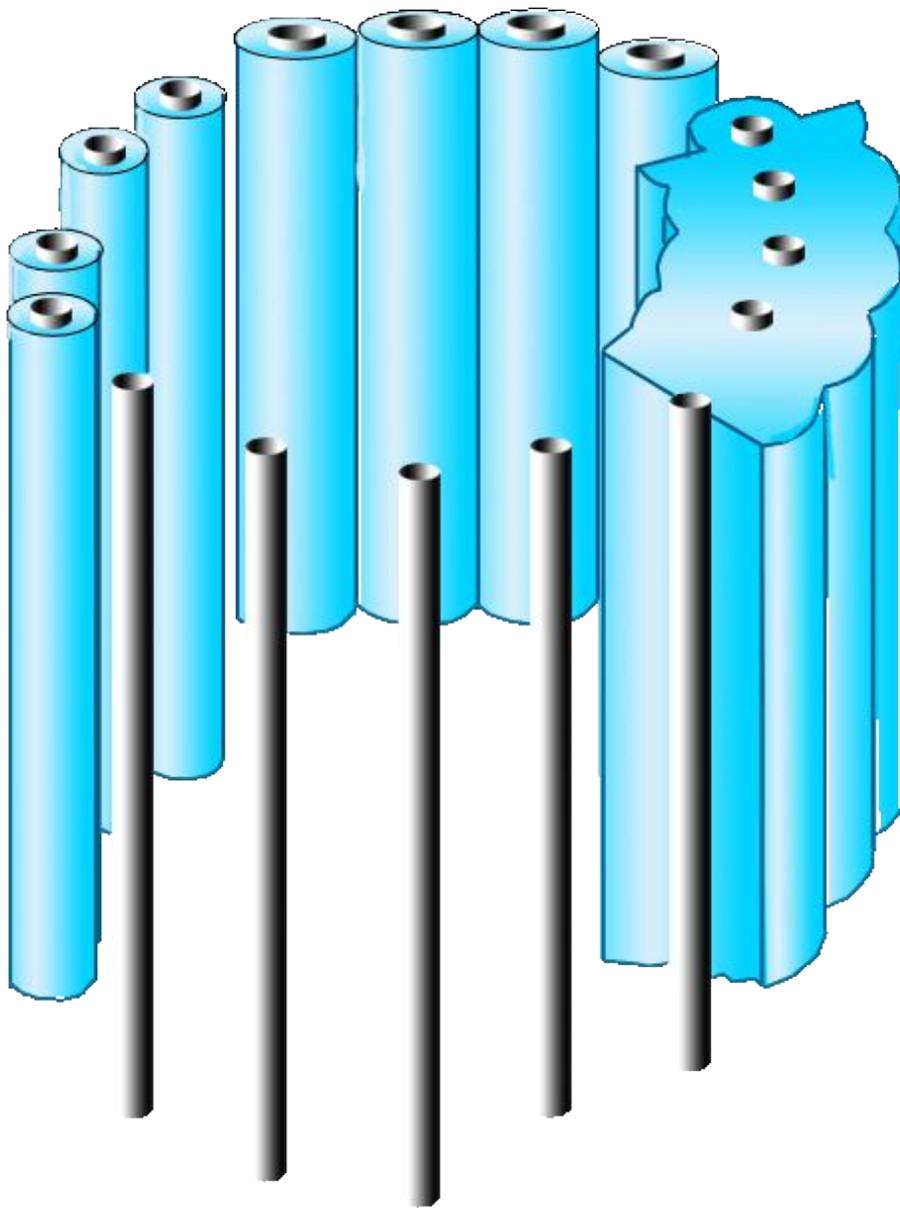
- В районах вечной мерзлоты температура горных пород **ниже** нуля.
- Отрицательная температура горных пород не позволяет эффективно бурить шпуры и скважины с **промывкой водой**.
- Имеется **опасность смерзания** полезного ископаемого при транспортировке и в бункерах.
- А повышение температуры пород может привести к опасному **снижению их прочности**.

- В промышленности нашел применение **термический способ разрушения** горных пород газовыми горелками с температурой газовой струи до 3000°C. Тепловые свойства горных пород в этом случае оказывают решающее влияние на эффективность процесса разрушения массива пород.
- При строительстве горных выработок в горных породах **насыщенных водой** часто применяется искусственное замораживание таких пород.

# Термическое бурение



- Термическое бурение - способ бурения выполняемый с помощью специальной огнеструйной горелки. На забое скважины с помощью высокотемпературных газовых струй выходящих со сверхзвуковой скоростью из сопел горелки, в результате сложного взаимодействия раскалённых струй и воды с разрушаемой породой происходит бурение



- *Схема этапов замерзания ледопородного ограждения*

- Определение теплофизических свойств минералов и пород имеет и большое прикладное значение в связи с расширением масштабов воздействия человека на земную кору. Так, с увеличением глубин разрабатываемых месторождений **воздух в горных выработках нагревается выше допустимых пределов**. А в районах вечной мерзлоты строительные, горные, буровые работы осложняются **специфическими особенностями поведения пород при отрицательных температурах**, что потребовало их детального изучения и разработки специальных технологий.<sup>18</sup>

# **Тепловые свойства горных пород характеризуются следующими параметрами:**

- 1. Теплоемкость горных пород**
- 2. Теплопроводность**
- 3. Температурное расширение**

# Теплоемкость горных пород

- Поглощение породами тепла сопровождается повышением кинетической энергии колеблющихся в них атомов и молекул.
- Это приводит к изменению температуры породы.
- При этом наблюдается прямо пропорциональная зависимость между количеством теплоты поглощаемой породой и приростом температуры.

$$dQ = C \cdot dT$$

- где  $dQ$  – количество теплоты переходящее во внутреннюю энергию тела, Дж;
- $dT$  – изменение температуры породы, град. К;
- **$C$  – теплоемкость породы** (показатель, характеризующий изменение тепловой энергии при изменении температуры на один градус Кельвина).

- Величина **C**, отнесенная к единице массы нагреваемого объема породы, называется **удельной теплоемкостью породы** и выражается в Дж/(кг·К).
- Определяется по формуле:

$$c = \frac{C}{m}$$

$$c = \frac{dQ}{m \cdot dT}$$

- Следовательно, удельная теплоемкость — это количество тепла, необходимое для нагревания единицы массы породы (1 кг) на 1 град.
- Единицей удельной теплоемкости является Дж/(кг·К).
- Теплоемкость характеризует способность пород поглощать тепловую энергию. Она имеет существенное значение для разрушения пород при тепловом воздействии (термическом бурении, комбинированных термомеханических способах разрушения горных пород), при решении вопросов, связанных с высокими температурами в горных выработках и на забое глубоких и сверхглубоких скважин, а также при расчетах технологических параметров обогащения и переработки горно-металлургического сырья.

- Удельная теплоемкость различных горных пород находится в относительно узком интервале.
- Для большинства пород этот интервал равен  $0,4...2$  кДж/(кг·К);
- для металлов —  $0,125$  (золото, свинец), ...  $0,46$  кДж/(кг·К) (железо).
- Соответственно рудные минералы имеют низкую теплоемкость, а рудосодержащие породы — пониженную по сравнению с безрудными.

- В твердых телах обмен кинетической энергией происходит:
  - 1. за счет столкновения электронов
  - 2. передачей колебаний кристаллической решеткой.

Первый тип теплопроводности называется **электронным**.

- Он характерен для сред имеющих электронную проводимость – **металлов и полупроводников**.

- Второй тип теплопроводности, характерный для горных пород, можно представить как вид упругих колебаний частиц кристаллической решетки.
- Эти колебания, согласно квантовой теории, могут быть представлены **фононами**, по аналогии с фотонами для электромагнитного поля.

- Поэтому, этот тип теплопроводности называют фононным. Каждый фонон, обладает энергией равной:

$$\varepsilon = \hbar \cdot f$$

- где  $\hbar$  – постоянная Планка ( $1,0546 \cdot 10^{-34}$  Дж·с);
- $f$  – частота тепловых колебаний.

- Первым законом, теоретически определившим теплоемкость твердых тел, был закон **Дюлонга и Пти**. По этому закону теплоемкость всех твердых тел должна быть одинаковой и составлять около 6 калл/град моль.
- **Закон Дюлонга — Пти** (*Закон Дюлонга и Пти, Закон постоянства теплоёмкости*) — согласно которому молярная теплоёмкость твёрдых тел при комнатной температуре близка к  $3R$ , где  $R$  — универсальная газовая постоянная.



Пьер Луи Дюлонг

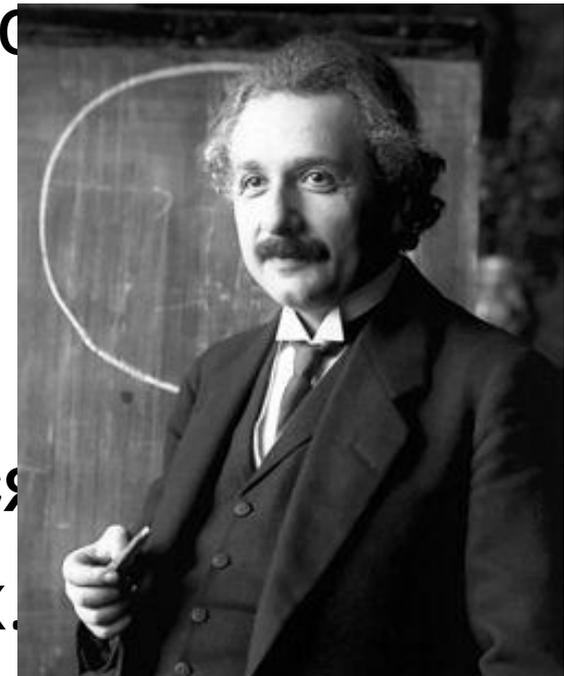
Алексис Терез  
Пти (Petit),



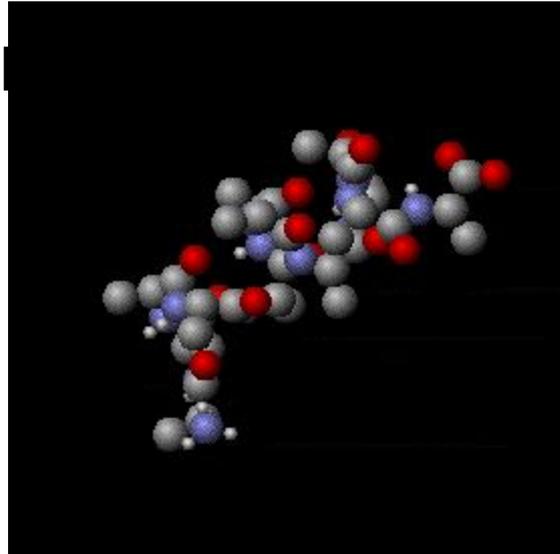
Однако опыт показывает, что:

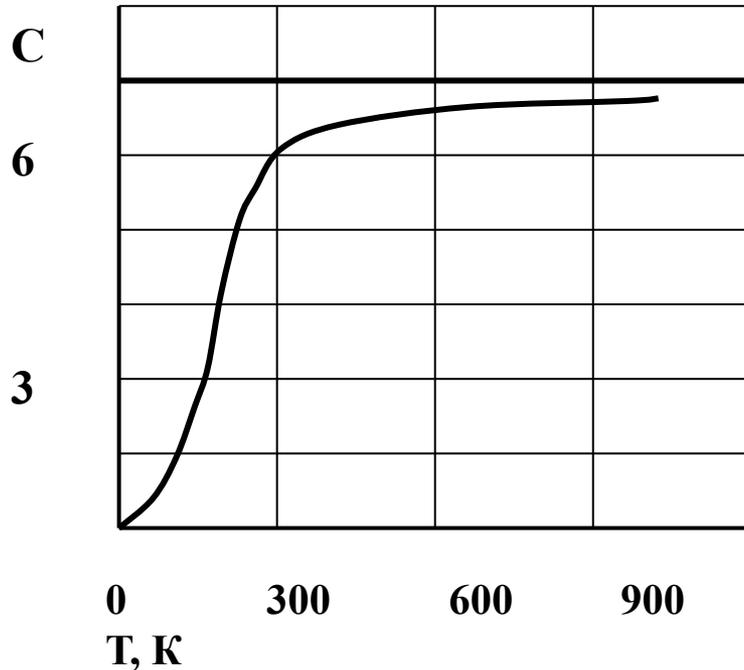
- 1. При высоких температурах теплоемкость твердых тел медленно возрастает с ростом температуры;
- 2. Теплоемкость резко падает при низких температурах и стремится к нулю, когда температура твердого тела стремится к абсолютному нулю.

- Первое объяснение зависимости теплоемкости твердых тел от температуры было предложено Эйнштейном (1907 г.).
- Он впервые создал квантовую теорию теплоемкости твердого тела.
- Однако и его теория давала результат отличавшийся от экспериментальных данных.



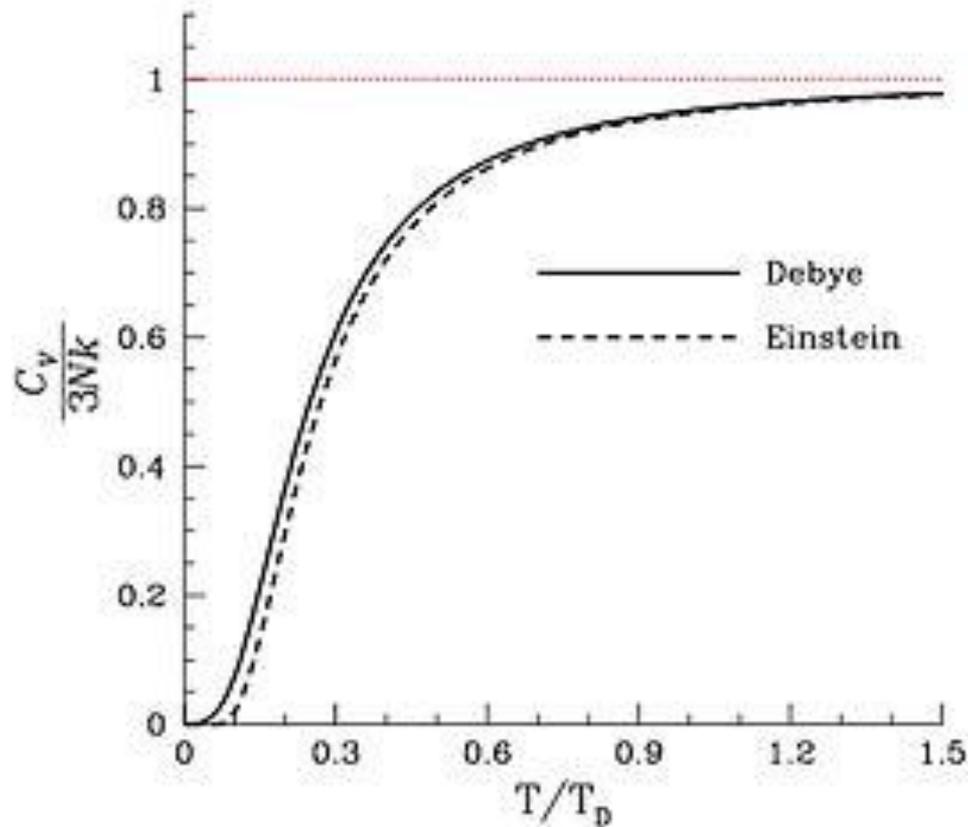
- Недостаток этой теории был учтен в теории теплоемкости твердого тела, предложенной **Дебаем**.
- В теории Дебая утверждается, что тепловые колебания в твердом теле обладают дискретным спектром
- На основании этих предпосылок Дебай получил закон, который хорошо подтверждается экспериментально.





$$C = \frac{12}{5} \cdot \pi^4 \cdot R \cdot \left( \frac{T}{\Theta} \right)^3$$

- где  $R$  - газовая постоянная;
- $\Theta$  - характеристическая температура, соответствующая максимальной частоте тепловых колебаний в твердом теле.



- Сравнение температурных зависимостей удельной теплоёмкости, полученных Эйнштейном и Дебаем. Видно, что в области высоких температур теплоёмкость выходит на постоянное значение, даваемое законом Дюлонга — Пти.

- Этот закон показал, что «**при очень низких температурах** теплоемкость всех твердых тел пропорциональна кубу абсолютной температуры».
- А в области положительных температур теоретические и экспериментальные данные, также имеют хорошую сходимость.

- Однако, для горных пород эти закономерности сохраняются не всегда.
- Аномалии зависимости теплоемкости от температуры характерны для каменного угля, глин и других пород, способных **существенно изменять свойства** при воздействии тепла.

**Удельная теплоемкость породы полностью зависит от ее минерального состава. Она может быть рассчитана по формуле арифметического средневзвешенного:**

$$c_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^n c_i \cdot m_i$$

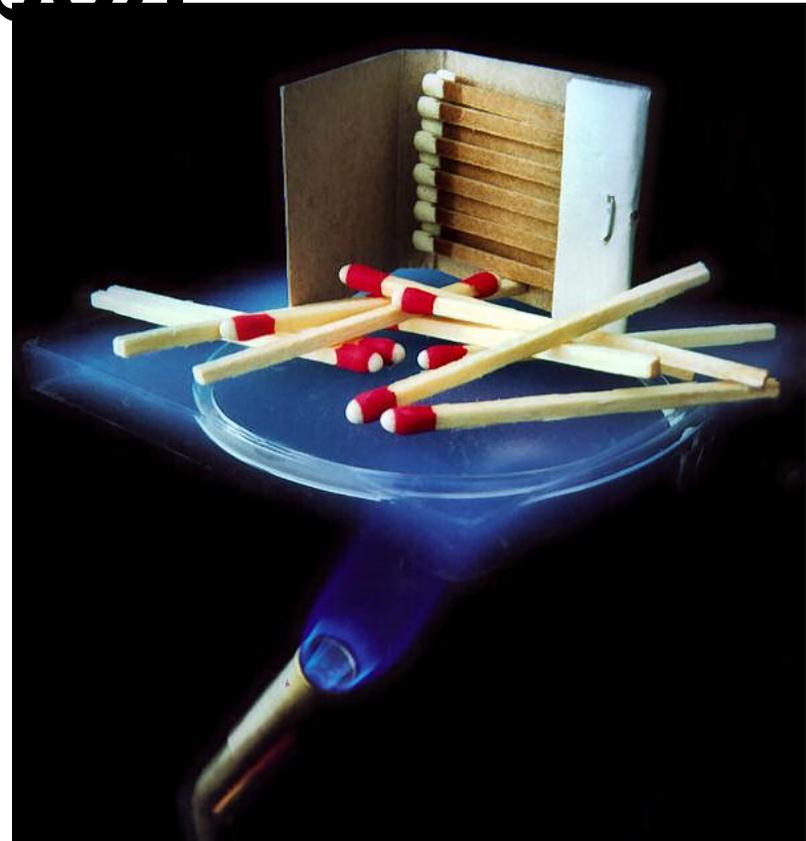
- где  $m_i$  - относительное массовое содержание минерала с удельной теплоемкостью  $c_i$ .

# Теплоемкость горных пород зависит от:

- **температуры** (с увеличением температуры увеличивается);
- **пористости** (удельная теплоемкость не меняется, а **объемная** - уменьшается с увеличением пористости);
- **влажности** (с увеличением влажности теплоемкость увеличивается).

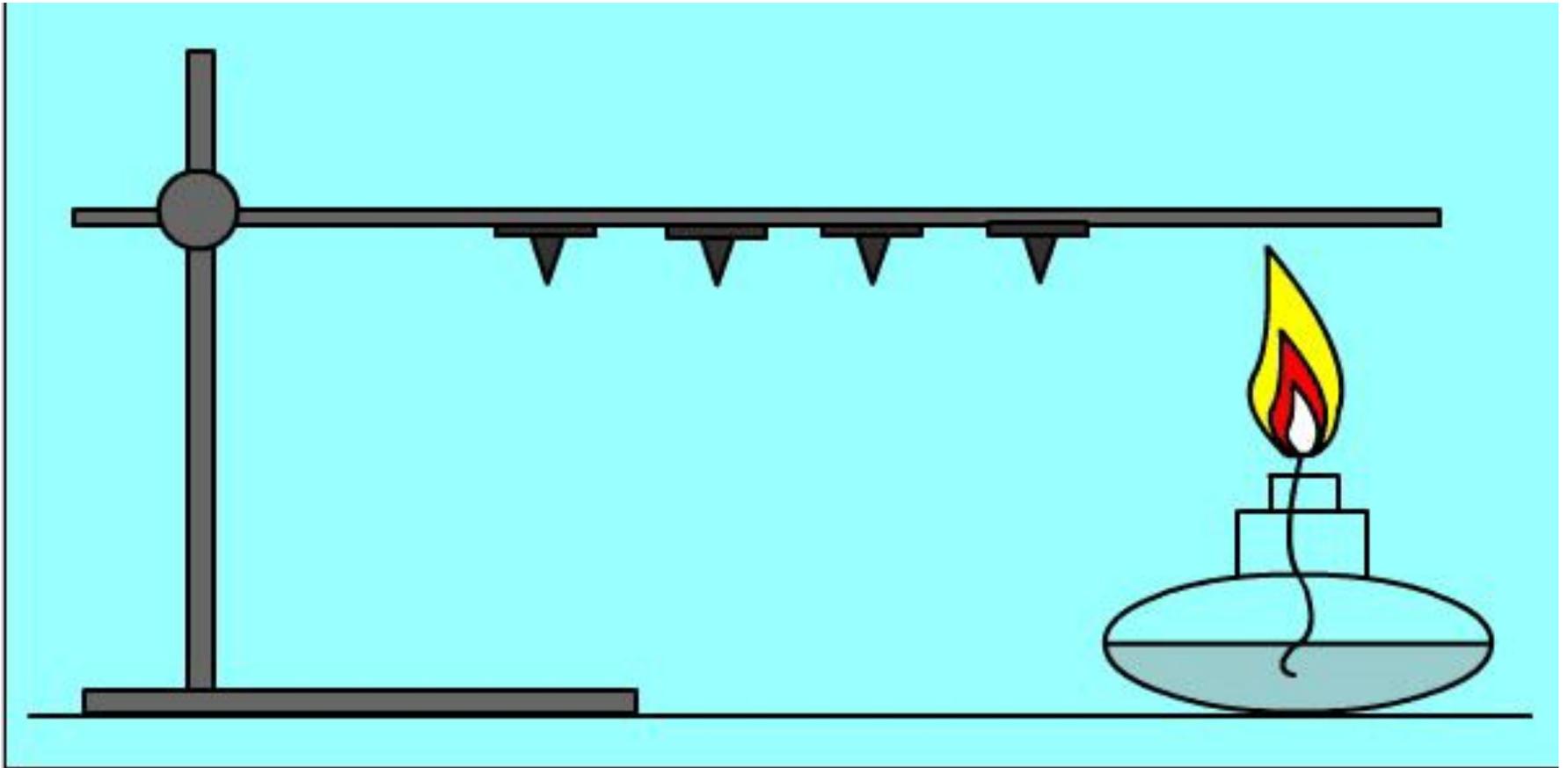
- Так как теплоемкость воды (  $2 \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}$  ), значительно превышает теплоемкость любого минерала, то теплоемкость пористых, насыщенных водой пород больше чем сухих.
- Удельная теплоёмкость пород возрастает с повышением температуры, что обусловлено ростом частоты колебаний. Это повышение происходит до определённой температуры (температура Лебая)

# Теплопроводность горных пород

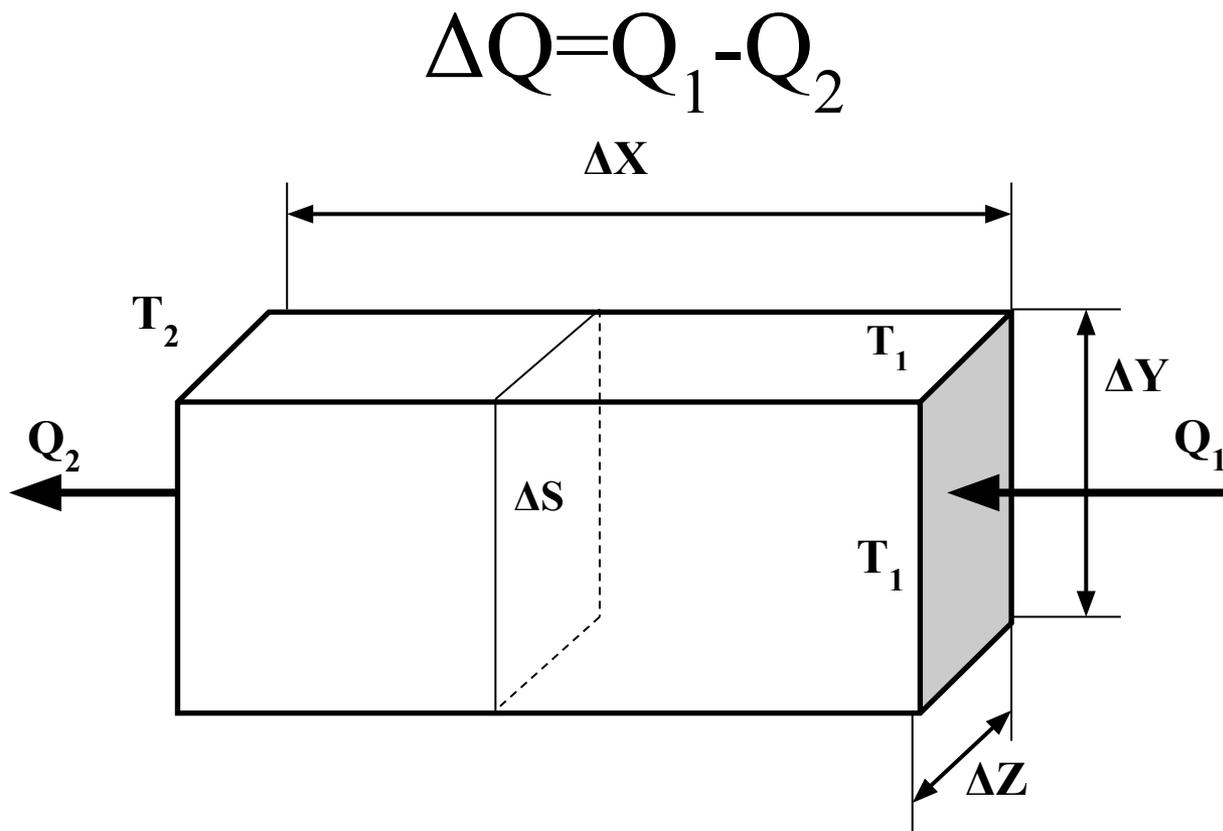


- Цветок на куске аэрогеля над горелкой Бунзена

# Теплопроводность



# Теплопроводность горных пород



$$T_1 > T_2$$

- Если рассмотреть прямоугольный образец породы, имеющий две противоположные плоскости с температурой соответственно  $T_1$  и  $T_2$ ,
- причем  $T_1 > T_2$ ,
- то количество тепла  $\Delta Q = Q_1 - Q_2$ , переходящего из одной плоскости к другой через площадку  $\Delta S$  за время  $dt$  будет равно:

$$\Delta Q = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{\Delta X} \cdot \Delta S \cdot dt$$

- где  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности горной породы;
- $\Delta T = T_1 - T_2$  - разность температур плоскостей;
- $\Delta X$  - расстояние между плоскостями выделенного объема породы.
- Отношение  $\Delta T / \Delta X = \text{grad } T$  - называется **градиентом температуры** и выражает скорость изменения температуры на единице длины вдоль оси X.

- Отношение  $\Delta Q / (\Delta S \, dt) = q$  – это **удельный тепловой поток**, который выражает количество тепла, проходящего в единицу времени через единицу площади.

- **Коэффициент теплопроводности пород  $\lambda$ , Вт/(м К)** – это количество тепла, проходящего через единицу площади в единицу времени при градиенте температуры равном единице.

$$\lambda = \frac{q}{\text{grad}T} = \frac{\Delta Q \cdot \Delta X}{\Delta S \cdot \Delta T \cdot dt}$$

- Эта формула выражает макроскопическую теплопроводность.

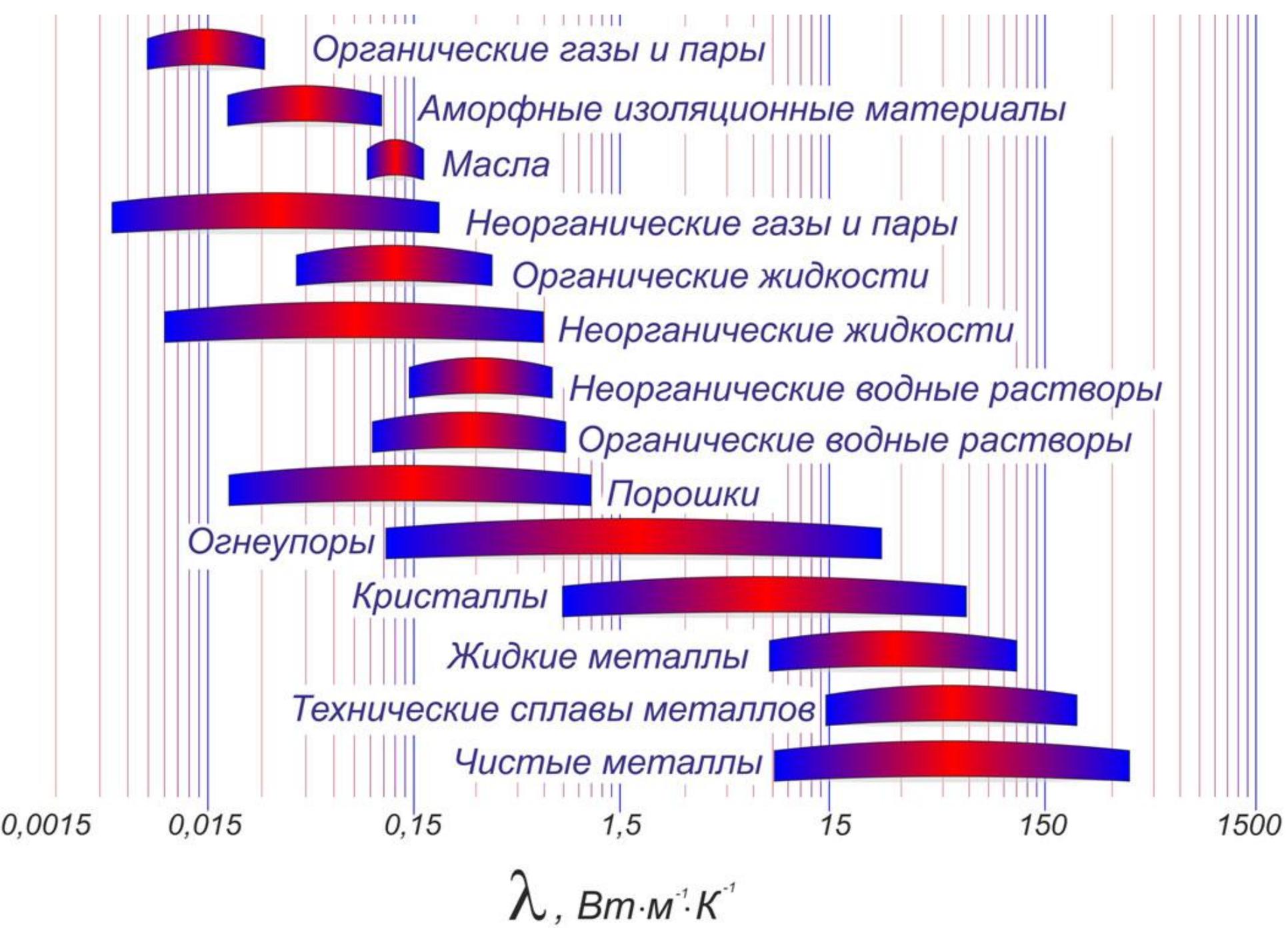
Рассматривая процесс передачи тепла на микроскопическом уровне (фононном), можно определить теплопроводность следующим образом:

$$\lambda = \frac{1}{3} \cdot c_v \cdot v \cdot \rho \cdot l$$

- где,  $c_v$  – удельная теплоемкость при постоянном объеме;
- $v$  – средняя скорость распространения упругих волн в породе;
- $l$  – длина свободного пробега фононов;
- $\rho$  – плотность породы.

- Величина свободного пробега фонона, является тем фактором, который препятствует быстрому распространению тепла в породе.
- Для кристаллов каменной соли  $l=30 \cdot 10^{-8}$  см, для кварца  $l=60 \cdot 10^{-8}$  см.

- Коэффициент теплопроводности горных пород ( $\lambda$ ) меняется в пределах 0,7-7 Вт/мК. У кварца он равен 12, а у алмаза 200.
- Коэффициент теплопроводности глинистых, насыщенных водой пород в 6-8 раз больше, чем сухих.



- С повышением температуры теплопроводность снижается в связи с уменьшением длины свободного пробега фононов.
- При температуре  $1200^{\circ}\text{C}$  коэффициент теплопроводности почти всех пород находится в пределах **1,1-2,3 Вт/мК**.

- **Теплопроводность** **породы** определяется способностью минералов, из которых она состоит, проводить тепло.
- Необходимо учитывать как расположены минералы относительно направления распространения тепла –
  1. последовательно,
  2. параллельно или
  3. хаотически.

# Теплопроводность горных пород зависит от:

- Минерального состава;
- Плотности;
- Структуры;
- Пористости;
- Влажности;
- Температуры;
- Давления.

- Теплопроводность пористых пород зависит от объема, формы пор и фазового состояния заполнителя (газ, жидкость).

С увеличением пористости она уменьшается.

- С увеличением температуры у большинства горных пород теплопроводность снижается, что объясняется хаотичностью движения молекул в кристаллической решетке, что уменьшает длину свободного пробега фонона.
- Понижение температуры увеличивает теплопроводность пород.

- Если тепло переходит через какую-то граничную поверхность из одной породы в другую, имеющей отличные от первой тепловые свойства, то такой процесс называется **теплопередачей**.
- Теплопроводность можно считать частным случаем теплопередачи, когда тепловые свойства на границе одинаковы: количество тепла, прошедшего из одного тела в другое определяется формулой:

$$\Delta Q = k_{tp} \cdot \Delta T \cdot \Delta S \cdot dt$$

- При переходе тепла из одной среды в другую наблюдается **скачек температур**.
- **Теплопередача** происходит при распространении теплового потока перпендикулярно слоистости и трещиноватости пород, **на контактах** вмещающих пород и полезных ископаемых и т.д. Теплопередача может осуществляться между жидкостями, газами и породой.

- Если горная порода обладает более высокой температурой, чем соприкасающаяся с ней внешняя среда, то явление теплопередачи называют

**теплоотдачей**

$$k_{to} = \frac{dQ}{\Delta S \cdot \Delta T \cdot dt} \quad \text{Вт/м}^2 \text{ К}$$

- **Теплоотдача горных пород** имеет большое значение для расчета теплового режима шахт при повышенной температуре горных пород, а также при замораживании пород и контактном плавлении полезных ископаемых.

# Температуропроводность пород

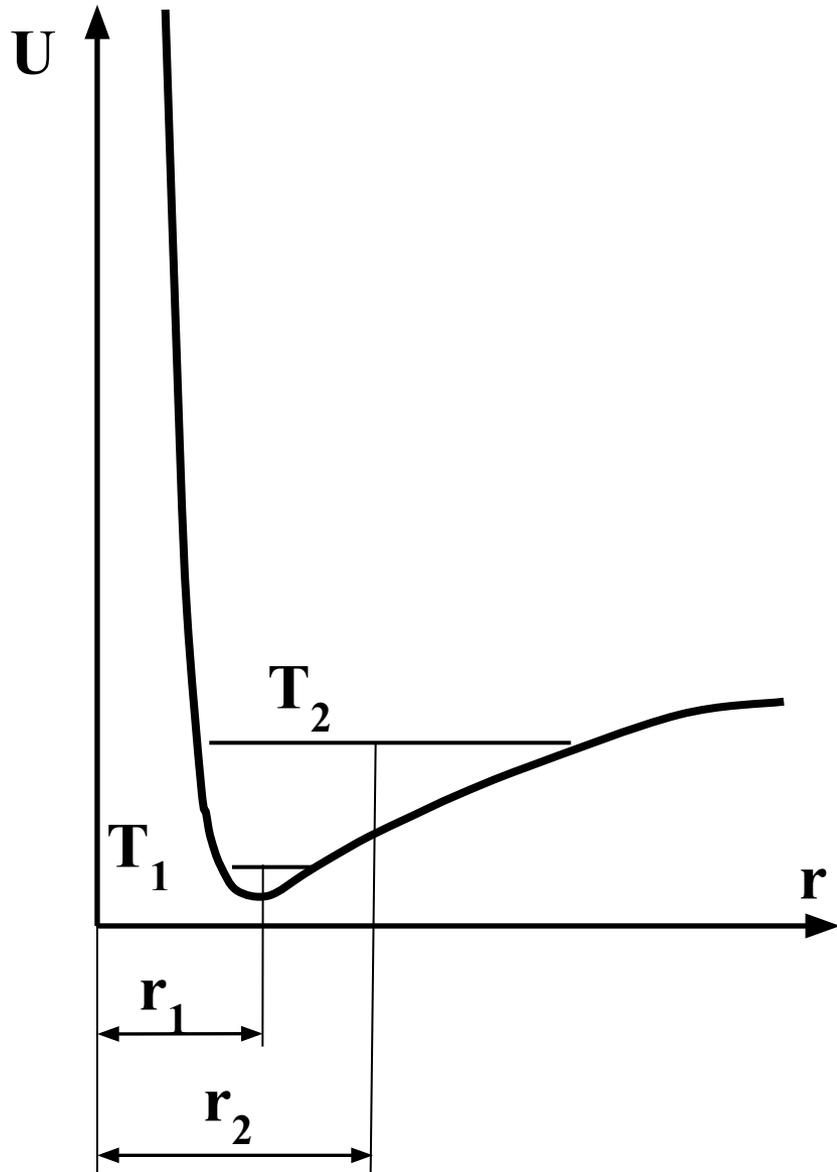
- **Коэффициент температуропроводности** -  **$a$**  ( $\text{м}^2/\text{час}$ ) характеризует скорость изменения температуры горной породы вследствие поглощения или отдачи тепла.
- **Температуропроводность** - параметр, зависящий от значений коэффициентов теплопроводности, теплоемкости и плотности пород ( $\lambda, c, \rho_0$ ).

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho_0}$$

- Величина **температуропроводности** горных пород меняется в пределах  $10^{-6} \dots 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ .  
и зависит от строения породы.
- Пористость и слоистость пород приводит к снижению **температуропроводности**.
- С **увеличением плотности** породы **температуропроводность** незначительно **уменьшается**.
- С **повышением температуры**, она так же **уменьшается**.

# Тепловое расширение пород

- Все знают, что при нагревании тела расширяются.
- Причина теплового расширения тел кроется в форме кривой потенциальной энергии взаимодействия атомов (молекул).

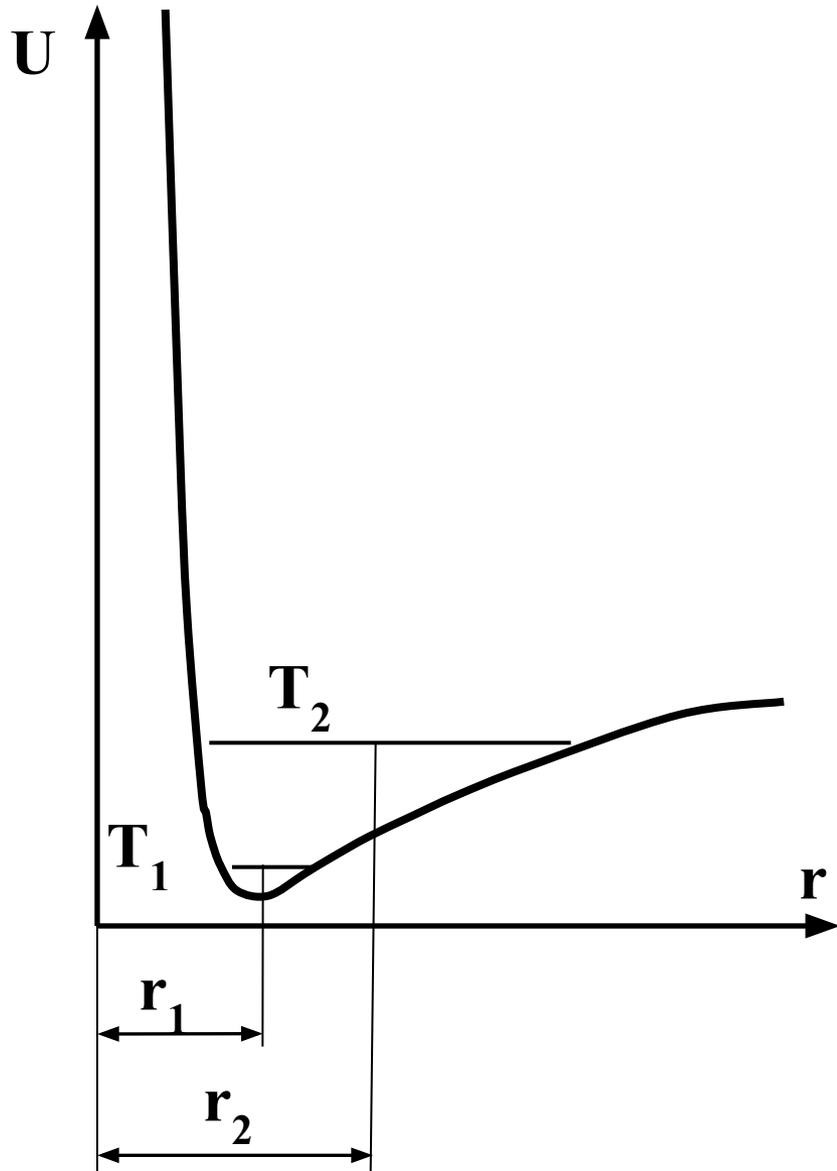


- Потенциальная кривая энергии взаимодействия всегда асимметрична:
- в сторону уменьшения расстояния она круто идет вверх;
- в сторону увеличения расстояния у потенциальной ямы должен существовать борт.

Такая форма кривой отражает два факта:

- два атома могут быть сближены на ограниченное расстояние;
- отдалению атомов предела нет. При больших расстояниях произойдет разрыв связи между атомами (молекулами) и образуется дефект кристаллической решетки.

- На потенциальной кривой можно отметить крайние расстояния, до которых будут доходить колеблющиеся атомы. Среднее положение атома  $r_1$  соответствует середине этого отрезка.
- При увеличении температуры от  $T_1$  до  $T_2$  энергия частицы возрастает и она перейдет на другой энергетический уровень.
- Так как потенциальная кривая асимметрична, то среднее положение атома сдвинется вправо до  $r_2$ , т. е. увеличится.
- **В этом заключается причина теплового расширения.**



- Если рассматривать цепочку частиц, выделенных вдоль тела, то смещения всех частиц в сумме дадут общее удлинение тела при его нагревании.

- Связь между повышением температуры  $dT$  и расширением породы  $dL$  определяется уравнением:

$$dL = \beta \cdot L \cdot dT$$

- где  $L$  - первоначальная длина образца;
- $\beta$  - коэффициент теплового линейного расширения ( $\text{град}^{-1}$ ), характеризующий способность горной породы изменять свои линейные размеры при изменении температуры.

- Аналогичная формула описывает объемное расширение пород.

$$dV = \omega \cdot V \cdot dT$$

где

- $\omega$  - коэффициент теплового объемного расширения;
- $V$  - первоначальный объем образца.

- Коэффициенты линейного и объемного теплового расширения пород являются важными тепловыми характеристиками пород, обуславливающими **способность пород трансформировать тепловую энергию в механическую.**

- Высокими значениями  $\beta$  обладают *сера, каменная соль, слюда*

- Кристаллы и слоистые горные породы **анизотропны** в отношении теплового расширения.
- Так, например, кварц в одном направлении расширяется вдвое больше, чем в двух других направлениях, а монокристалл кальцита удлиняется только в одном направлении, а в остальных направлениях сокращается.

# Тепловое расширение зависит от:

- **температуры** (увеличивается);
- **влажности** (несколько увеличивается);
- **пористости** (уменьшается);
- **давления** (уменьшается);
- **минерального состава.**

- Все рассмотренные выше тепловые параметры не связаны с фазовыми изменениями пород.
- **В то же время повышение температуры пород приводит и к полиморфным превращениям минералов - **плавлению, испарению** и т.д.**

# ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

## ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

УДЕЛЬНАЯ  
ТЕПЛОЁМКОСТЬ  $c$

$$c = 0,4-2 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К.}$$

$$1,5 \cdot 10^3 \leq c_p \leq 3 \cdot 10^3 \text{ кДж/м}^3 \cdot \text{К}$$

УДЕЛЬНОЕ ТЕПЛОВОЕ  
СОПРОТИВЛЕНИЕ

$$\sum 1/\lambda$$

КОЭФФИЦИЕНТ  
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ  $\lambda$

$$dQ = \lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} S dt$$

КОЭФФИЦИЕНТ  
ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ  $a$

$$a = \frac{\lambda}{c_p} \quad \alpha_L = \frac{dL}{L dT} \quad \alpha_V = \frac{dV}{V dT}$$