

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМНОЙ КОРЫ (ТЕПЛО ЗЕМНЫХ НЕДР)

Верхняя толща горных пород Земли называется земной корой. Земная кора простирается от поверхности Земли до границы Мохоровичича, которая отделяет земную кору от мантии Земли. Мощность земной коры в среднем колеблется от 7-10 км под дном океана и до 35-40 км на континенте. Ниже земной коры располагаются верхняя и нижняя мантии Земли, далее следует внешнее и внутреннее ядра Земли.

Средняя плотность Земли составляет $5,52 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$, а средняя плотность земной коры $2,73 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$. Плотность Земли возрастает с глубиной, на поверхности она равна $2,7 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$, а во внутреннем ядре, т.е. на глубине 5100-6371 км, составляет $(12-12,3) \times 10^3 \text{ кг/м}^3$. Это связано с увеличением давления P по мере приближения от поверхности Земли к ее центру, которое можно рассчитать по следующей формуле:

$$dP/dr = -gy = -\Gamma m\gamma/r^2, \quad (9.1)$$

где r — текущее значение радиуса Земли, м; g — ускорение свободного падения, м/с²; γ — текущее значение плотности, $\gamma = \gamma(r) \text{ кг/м}^3$; Γ — гравитационная постоянная, $\Gamma = 6,67 \times 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$; m — масса сферы радиусом r , кг.

Согласно выражению (9.1), давление в центре Земли должно составлять около $3,5 \times 10^5$ млн Па.

С позиции ведения горных работ интерес представляют термодинамические параметры земной коры и то лишь в ее верхних слоях.

Температура земной коры в слое пород, непосредственно прилегающем к поверхности Земли, зависит от времени суток и года. Глубина, до которой прослеживается влияние атмосферных колебаний температуры, достигает не более 20 м (чаще всего эта глубина составляет 6-7 м). Ниже этой глубины температура пород повышается. Таким образом, существует слой породы, в котором температура остается постоянной в любое время года. Этот слой

называется *нейтральным*. Глубина залегания нейтрального слоя H_0 (м) не одинакова для различных районов Земли, но постоянна для данного района.

С увеличением глубины H ниже нейтрального слоя температура горных пород земной коры увеличивается приблизительно по линейному закону:

$$T = T_0 + \Gamma_r(H - H_0), \quad (9.2)$$

где T_0 — температура нейтрального слоя, К;

Γ_r — геотермический градиент, $\Gamma_r = \partial T / \partial H$, К/м.

Величина, обратная геотермическому градиенту, называется *геотермической ступенью* ($\Gamma_c = \partial H / \partial T$).

Согласно выражению (9.2), геотермический градиент Γ_r (К/м) и геотермическая ступень Γ_c (м/К) соответственно равны

$$\Gamma_r = (T - T_0) / (H - H_0) \quad (9.3)$$

$$\Gamma_c = (H - H_0) / (T - T_0). \quad (9.4)$$

Среднее значение геотермического градиента составляет 0,032 К/м. Геотермический градиент изменяется от 0,008 до 0,1 К/м. Средняя его величина в районе Криворожского бассейна составляет 0,016 К/м, в районе Донбасса — 0,02 К/м, а в районах локальных термоаномалий Камчатки и Кавказа она достигает 0,2 К/м.

На некоторых горнодобывающих предприятиях, особенно в районах с большими значениями геотермического градиента, на глубинах более 1,5-2 км температура горных пород превышает санитарные нормы (табл. 9.1), что требует применения специальных технико-гигиенических мероприятий для обеспечения нормальных условий труда.

При среднем геотермическом градиенте, равном 0,032 К/м, температура на глубине 5 км составит около 433 К (160°C). Количество тепла, аккумулированное в 1 км³ горных пород при их объемной теплоемкости, равной $(0,8-1,2) \cdot 10^3$ кДж/(м³*К), на этой глубине составит около $(12-20) \cdot 10^{13}$ кДж, что эквивалентно теплу, получаемому при сжигании $(4,3-7,1) \cdot 10^6$ т условного топлива (теплота сгорания условного топлива равна $29,3 \cdot 10^3$

кДж/кг). Для сопоставления интересно отметить, что суммарная теплота сгорания всех мировых запасов топлива составляет примерно $16 \cdot 10^{19}$ кДж.

Таблица 9.1

Район или РУДНИК	Страна	Добываемое полезное ископаемое	Глубина, м	Температура, К(°С)	Геотермическая ступень, Г _с . м/К
Донбасс	Украина	Уголь	1450	313(40)	38
Колар	Индия	Золото	2750	330(57)	65
Морро-Вальхо	Бразилия	Золото	2325	327(54)	н.д.
Магда	США	Медная руда	1220	333(60)	36.2

Так как с увеличением глубины ниже нейтрального слоя температура горных пород повышается, то, согласно второму закону термодинамики, тепло движется из глубинных слоев земной коры к ее поверхности.

Средний удельный тепловой поток из недр Земли к ее поверхности составляет $q_{ср} = 7 \cdot 10^{-2}$ Вт/м². Общее количества тепла, выделяемое с поверхности Земли при данном удельном тепловом потоке, составляет $8 \cdot 10^{20}$ Дж/год, что эквивалентно теплу, получаемому при сжигании 27 млрд т условного топлива или примерно $1,9 \cdot 10^{10}$ т нефти.

В области древних щитов удельный тепловой поток минимален, $q = (3,3-4,6) \cdot 10^{-2}$ Вт/м², в районах молодых горных образований он достигает до $8 \cdot 10^{-2}$, а в районах современных вулканов — до $(16-32) \cdot 10^{-2}$ Вт/м²

Из-за малой величины удельного геотермического потока его использование в практических целях весьма сложно. Значительно больший практический интерес с точки зрения энергетических ресурсов будущего представляет использование глубинного тепла, сконцентрированного в горных породах на глубине до 3 км, в том случае, если их температура превышает 393-423 К (120-150°С). Эти условия соответствуют районам

Крыма, Предкарпатья, Закарпатья. В настоящее время практический интерес представляет тепловая энергия парогидротерм и термальных вод. Парогидротермы имеются на Камчатке, Курильских островах и в других районах с давлением пара в устье скважин до $(5-6) \cdot 10^5$ Па. Термальные воды обнаружены во многих районах Кавказа, Сибири, Средней Азии и других с дебитом до $50-60 \text{ м}^3/\text{ч}$, что позволяет использовать их для теплофикации ряда городов, развития парникового хозяйства.

2. Процессы теплопереноса в недрах Земли

Как было отмечено ранее теплообмен в горных породах осуществляется теплопроводностью, конвекцией и излучением. Применительно к задачам горного производства весьма важной является задача регулирования теплового режима шахт и рудников при отработке глубоких горизонтов, а также при подземной разработке в условиях многолетнемерзлых пород.

Решение практических задач регулирования теплового режима шахт и рудников непосредственно связаны с процессами теплопереноса в недрах Земли.

Теплоперенос за счет решеточной составляющей теплопроводности и конвекции в основном формирует тепловой режим верхних слоев земной коры. На глубинах более 50 км в связи с высоким давлением и температурой теплоперенос осуществляется главным образом за счет электронной составляющей теплопроводности и теплообмена излучением.

С увеличением глубины и повышением температуры решеточная составляющая теплопроводности уменьшается, а электронная увеличивается, поэтому на глубине около 100 км теплопроводность пород минимальна, что способствует дросселированию оттока тепла из глубинных слоев Земли к ее поверхности.

Так как теплоемкость воды очень велика, то составляющая теплопереноса за счет конвекции при движении подземных вод оказывает

существенное влияние в перераспределении тепловых потоков в верхних водонасыщенных слоях земной коры.