

# ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

## 1. Источники тепла земных недр

Тепловое поле земной коры формируется в результате процесса теплообмена при наличии источников тепла. Теплообмен в земной коре осуществляется посредством теплопроводности, конвекции и излучения.

В зависимости от природы процессов, приводящих к выделению тепла в недрах Земли, источники тепла можно подразделить на два типа: *первичные* и *вторичные*.

К первичным источникам относятся те, которые преобразуют в тепло энергию внеземного происхождения (энергию радиоактивного распада, энергию солнечной радиации, энергию земных приливов, гравитационную энергию). К вторичным источникам относятся те, которые преобразуют в тепло энергию внутривозмного происхождения (энергию фазовых и химических превращений, энергию тектонических движений). Первичные источники формируют тепловой режим Земли в целом, а вторичные — тепловые аномалии. Первичные источники длительны по времени (практически бесконечны) и значительны по мощности, вторичные — относительно кратковременны и маломощны.

Тепло радиоактивного распада называют радиогенным. Оно образуется в результате того, что при распаде происходит излучение  $\alpha$ - и  $\beta$ - частиц и  $\gamma$ - фотонов, которые поглощаются окружающими породами и передают им свою энергию. При этом вся их энергия превращается в тепло.

Количество тепла, образующегося в единицу времени в результате распада одного грамма радиоактивного вещества, называется *удельным радиогенным теплом*. Для основных радиоактивных элементов урана, тория и калия оно соответственно равно  $9,78 \times 10^{-5}$ ,  $26,3 \times 10^{-6}$  и  $35,5 \times 10^{-10}$  Дж/ (кг х с).

Все радиоактивные источники выделяют внутри Земли  $4 \times 10^{20} - 4 \times 10^{21}$  Дж ежегодно. Количество тепла, выделившегося в Земле за время ее существования в результате распада радиоактивных элементов, составляет  $(5,8-20) \times 10^{30}$  Дж.

Количество тепла, доставляемое на Землю солнечным излучением, можно определить по формуле

$$Q = A\pi R_p^2 \tau \quad (9.11)$$

где  $A$  — солнечная постоянная, равная  $0,138 \times 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>;  $R_3$  — радиус Земли, равный  $6,371 \cdot 10^6$  м;  $\tau$  — время, с.

Учитывая, что в году около  $3 \cdot 10^7$  с, и принимая во внимание, что под воздействием солнечного излучения находится постоянно только половина поверхности Земли, согласно выражению можно определить количество тепла, передаваемое Солнцем верхним слоям атмосферы Земли за один год. Оно составляет около  $27 \cdot 10^{23}$  Дж/год. Примерно половина этого тепла поглощается атмосферой и рассеивается в мировое пространство, а вторая половина поглощается на Земле.

Тепло, доставляемое на поверхность Земли солнечным излучением, формирует тепловой режим поверхностного слоя пород, расположенных выше нейтрального слоя. Суточные колебания температуры воздуха оказывают влияние на температурный режим поверхностного слоя Земли толщиной не более 0,5 м, а годовые — не более 20 м.

Выделение тепла в Земле в результате земных приливов обусловлено вертикальным смещением ее поверхности под действием притяжения Солнца и Луны. Такие смещения возможны вследствие того, что Земля не является абсолютно твердым телом, а земная кора разбита на блоки.

Вертикальные смещения поверхности Земли за счет земных приливов и отливов достигают 0,5 м. Количество тепла, выделяющегося в Земле в единицу времени, в результате этого составляет порядка  $4 \cdot 10^{26}$  Вт. Суммарное количество тепла, выделившееся в Земле за время ее

существования за счет приливов и отливов, составляет примерно  $36 \cdot 10^{29}$  Дж.

Гравитационная составляющая первичных источников тепла обусловлена выпадением на Землю мелких частиц и метеоритов и переходом их кинетической энергии в тепловую. Кроме этого, под действием сил гравитации в глубь Земли перемещаются более тяжелые вещества, что также сопровождается выделением тепла. Если предположить, что ядро Земли состоит из железа, которое стекалось к центру, то количество тепла, выделенного при этом, составит около  $10 \times 10^{30}$  Дж. Основным вторичным источником тепла является энергия тектонических движений, которая выделяется при землетрясениях в результате трений блоков земной коры друг о друга.

Тепловая энергия, образующаяся в результате фазовых переходов и химических реакций в Земле, вносит свой вклад в формирование теплового режима локальных районов.

## **2. Использование тепла земных недр**

Геотермальные ресурсы разделяют на повсеместно распространенные и локализованные. *Повсеместно распространенные геотермальные ресурсы* представлены теплом, которое аккумулировано твердыми горными породами. *Локализованные геотермальные ресурсы* — это участки земной коры с аномально высокими температурами. Они представлены очагами магмы, высокотемпературными газами, парами и водами. Повсеместно распространенные геотермальные ресурсы в пределах суши на глубинах до 8 км составляют примерно  $8 \times 10^{23}$  кДж. Локализованные геотермальные ресурсы можно оценить лишь весьма приближенно по количеству подземных вод и их температуре на заданной глубине. Полагают, что теплосодержание подземных вод в толще земной коры до 5 км составляет

около  $16 \times 10^{18}$  кДж, а в толще до 8 км —  $26,8 \times 10^{18}$  кДж. Локализованные геотермальные ресурсы имеют более высокую концентрацию, но меньше по абсолютному значению, чем повсеместно распространенные.

В настоящее время практическое применение находит тепло парогидротерм и термальных вод в России, Италии, Исландии, Новой Зеландии, Японии, США, Мексике, Венгрии (всего в 80 пунктах земного шара).

В основном это тепло используется для теплофикации и частично для выработки электроэнергии. Впервые электроэнергия на базе использования тепла термальных вод была получена в Италии в 1889 г. В России на базе термальных вод функционирует Паратунская электростанция на Камчатке. Суммарная мощность всех электростанций в мире, работающих на базе термальных вод, невелика и составляет в настоящее время около 1 млн кВт. Самая мощная электростанция такого типа функционирует в Италии. Ее мощность достигает 320 мВт. В России прогнозируется создание более мощной электростанции в районе г. Махачкалы на базе термальных вод с температурой до 423 К ( $150^\circ\text{C}$ ), которые будут добывать с помощью скважины, пробуренной на глубину до 5 км. Широкие возможности по использованию энергии термальных вод имеются в районах Сибири и юго-восточных районов России, где разведано более 50 бассейнов термальных вод с температурой 353-393 К ( $80\text{-}120^\circ\text{C}$ ), а в вулканических районах до 573 К ( $300^\circ\text{C}$ ).

С точки зрения энергетики будущего большой интерес представляет использование глубинного тепла горных пород, залегающих на глубинах до 6-8 км, имеющих температуру 423-473 К ( $150\text{-}200^\circ\text{C}$ ). В настоящее время ведутся исследования по разработке систем извлечения геотермических ресурсов.

Системой извлечения называется комплекс естественных и искусственных каналов и технических средств вывода тепла из недр земной коры на поверхность. Система извлечения включает в себя породные

теплообменники, вскрывающие каналы, подвижный теплоноситель, комплекс технических средств.

Породные теплообменники представляют собой объемные области массива горных пород с повышенной температурой, большой теплообменной поверхностью и проницаемостью, достаточной для фильтрации жидкого теплоносителя. Основной задачей породных теплообменников является интенсификация процесса отбора тепла от массива горных пород и передача его жидкому теплоносителю. Породные теплообменники могут быть естественными или искусственными, создаваемыми с помощью специальных взрывов в одной скважине или в серии скважин.

Вскрывающие каналы служат для отвода на земную поверхность теплоносителя. Они могут быть также естественными и искусственными. В качестве естественных вскрывающих каналов могут служить пористые пласты или трещиноватые породы, залегающие в массиве непроницаемых пород, соединяющие породные теплообменники с земной поверхностью. Искусственные вскрывающие каналы представляют собой скважину или систему скважин, пробуренных до глубины залегания породных теплообменников,

В качестве подвижного теплоносителя могут быть газы, пары парогазовые смеси, вода. Подвижные теплоносители подразделяют на природные (*эндогенные*) и нагнетаемые с земной поверхности к породному теплообменнику (*техногенные*).

Движение теплоносителя по вскрывающим каналам может быть естественным и принудительным. Естественное движение имеет место в том случае, когда давление в породном теплообменнике достаточно для перемещения теплоносителя по вскрывающим каналам на земную поверхность.

В этом случае подпитка породного теплообменника жидким теплоносителем осуществляется за счет естественной циркуляции или за счет термодиффузии влаги в массиве.

Принудительное движение теплоносителя по вскрывающим каналам возможно обеспечить путем нагнетания его через подающую скважину или систему подающих скважин к породному теплообменнику с последующей откачкой теплоносителя через заборную скважину. Нагнетаемый в теплообменник теплоноситель (нисходящий поток) отличается от откачиваемого (восходящий поток) не только температурой и теплосодержанием, но и агрегатным и химическим составом.

Задачей комплекса технических средств является улавливание и сбор теплоносителя, поддержание заданного напора и расхода нисходящего и восходящего потоков теплоносителя, отбор тепла от выведенного на поверхность теплоносителя и изменение его агрегатного и химического состава, передача тепла от получаемого теплоносителя рабочему теплоносителю с заданными параметрами.

В настоящее время вполне реальными являются проекты использования геотермальных ресурсов с применением искусственных вскрывающих каналов и зон повышенной трещиноватости массива на рабочих горизонтах (породных теплообменников). Теплопроизводительность породного теплообменника (количество тепла, отдаваемое теплоносителю в единицу времени) зависит от его объема и температуры пород. С целью вовлечения в активную область теплообмена с теплоносителем как можно большего объема пород рекомендуют создавать одну нагнетательную скважину и несколько отводящих. Нагнетательная скважина служит для нагнетания в породный теплообменник теплоносителя (воды), а отводящие скважины — для отвода нагретого теплоносителя от породного теплообменника до земной поверхности. На уровне рабочего горизонта каждую отводящую скважину состыковывают с нагнетательной путем искривления ствола скважин при их бурении. Искривленные участки скважин на уровне рабочего горизонта подвергают торпедированию с целью создания продольных (вдоль скважин) зон дробления массива с повышенной

проницаемостью, которые в совокупности представляют породный теплообменник.

Соединение вертикальной нагнетательной скважины с каждой отводящей может быть осуществлено, если последние будут пробурены под некоторым углом к вертикали в направлении нагнетательной скважины так, чтобы их соединение произошло на уровне рабочего горизонта. При этом тепедированию подвергаются нижние участки отводящих скважин. В этом случае теплопроизводительность породного теплообменника будет ниже по сравнению с вариантом искривленных на уровне рабочего горизонта отводящих скважин, так как объем породного теплообменника будет меньше. Под объемом породного теплообменника понимают объем зоны дробления массива на уровне рабочего горизонта с повышенной проницаемостью.

## **ТЕПЛООБМЕН В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ**

### **1. Требования к тепловому режиму в подземных выработках**

*Тепловой режим* в подземных выработках характеризуется совокупностью термодинамических параметров воздуха, окружающего массива, горной массы, машин и людей. Основными термодинамическими параметрами для количественной оценки теплового режима шахт и рудников являются температура, энтальпия, влагосодержание, а также изменение этих параметров в течение года.

В конечном итоге тепловой режим шахт и рудников определяется температурой, влагосодержанием рудничного воздуха и скоростью его движения в подземных выработках. Как показывает практика, в настоящее время при глубинах подземных разработок свыше 900-1000 м искусственное охлаждение и осушение рудничного воздуха практически неизбежно. В

условиях же разработки многолетнемерзлых пород, наоборот, необходимо подогреть рудничный воздух.

Таким образом, как в одном, так и другом случаях возникает необходимость регулирования теплового режима в подземных выработках.

Тепловой режим в подземных выработках должен обеспечивать комфортные условия труда человека, при которых бы он отдавал в окружающую среду столько тепла, сколько выделяется в его организме. В том случае, когда теплопотери человека больше, чем количество тепла, вырабатываемого в его организме, ему холодно, и наоборот. Следовательно, температура воздуха, его влажность и скорость в подземных выработках должны быть такими, при которых бы существовало равновесие между теплом, вырабатываемым в организме человека, и теплом, отдаваемым им в окружающую среду.

В организме человека в спокойном состоянии вырабатывается энергии около 320 кДж/ч (-90 Вт), при физической нагрузке средней напряженности — около 800 кДж/ч (-220 Вт) и при тяжелой физической нагрузке — до 1600 кДж/ч (-440 Вт).

Теплоотвод от человека через дыхание составляет 10%, а теплоотвод через кожу — 90% общего. Теплоотвод через кожу происходит путем лучеиспускания, конвекции и испарения пота.

Если температура воздуха выше температуры тела человека, то вдыхаемый воздух охлаждается в организме, отдавая ему часть своего тепла, и наоборот. В первом случае, дыхание затрудняет теплообмен между человеком и окружающей средой. Во втором случае, особенно при температуре воздуха ниже допустимой, может наступить переохлаждение организма.

Теплообмен организма человека с окружающей средой путем лучеиспускания может происходить только в том случае, если температура стенок выработки ниже температуры его кожи, то есть 307-309 К (34-36°C). В противном случае лучеиспускание противодействует теплообмену. При

температуре стенок выработки 293 К (20°C) путем лучеиспускания организм человека теряет около 120 кДж/ч (-33 Вт), а при температуре 313 К (40°C) получает около 40-60 кДж/ч (-11-15 Вт).

Удельный тепловой поток, отдаваемый кожей человека в окружающую среду конвекцией, пропорционален скорости движения воздуха и разности между его температурой и температурой кожи человека. Из этого следует, что для обеспечения теплообмена конвекцией необходимо регулировать температуру и скорость движения рудничного воздуха.

Равнозначным в количественном отношении с теплообменом конвекцией является отвод тепла из организма человека путем потовыделения. При выделении человеком 1 кг пота он теряет около 2260 кДж тепла и 8 г соли.

Потовыделение происходит только в том случае, когда влажность воздуха не выше влажности насыщения. В противном случае теплообмен путем потовыделения прекращается. Из этого следует, что регулирование влажности шахтного воздуха является одним из основных каналов управления тепловым режимом в подземных выработках.

Тепловой режим в подземных выработках должен поддерживаться таким, чтобы обеспечивался нормальный теплообмен организма человека в окружающей среде по всем четырем каналам: дыханием, лучеиспусканием, конвекцией и потовыделением. Канал теплообмена дыханием реализуется, когда температура воздуха ниже 310 К (37°C). Канал теплообмена лучеиспусканием — когда температура стенок выработок ниже 307 К (34°C). Так как температура воздуха в выработке на 2-3 градуса ниже температуры стенок, то температура шахтного воздуха по условиям теплообмена лучеиспусканием должна быть ниже 304-305 К (31 -32°C).

Канал теплообмена конвекцией реализуется, когда имеется движение воздуха в подземных выработках.

Канал теплообмена потовыделением реализуется, когда влажность воздуха в выработках ниже влажности насыщения.

Если закрыты все четыре канала теплообмена человека с окружающей средой в течении длительного времени, то наступает тепловая смерть.

Как показывает практика, комфортные условия труда по тепловому режиму при средней физической нагрузке на организм человека имеют место в том случае, когда температура, относительная влажность и скорость движения воздуха в подземных выработках соответственно равны 298 К (25°C), 80-90% и 4 м/с. Если, например, температура воздуха будет 301 К (28°C), то при прежних остальных его параметрах к концу семичасовой рабочей смены температура тела человека поднимется до 300,1 К (37,1°C). Таким образом, регулирование теплообмена через вышеуказанные каналы необходимо осуществлять путем изменения температуры, влажности и скорости движения воздуха в подземных выработках.

Без регулирования рудничного микроклимата возможности сбалансирования количества вырабатываемого в организме человека тепла  $Q_4$  с теплом  $Q_T$ , отдаваемым им во внешнюю среду, весьма ограничены. В какой-то степени это удается осуществить с помощью спецодежды, которая в зависимости от рудничного микроклимата может быть легкой или утепленной.

При переходе из одного рудничного микроклимата в другой терморегуляционный аппарат человека старается сбалансировать величины  $Q_4$  и  $Q_T$ , однако этот аппарат обладает некоторой инерционностью (10-15 мин) и поэтому резкие изменения параметров рудничного микроклимата и, в частности, температуры для организма человека весьма нежелательны.

Если  $Q_T > Q_4$ , то наблюдается переохлаждение организма человека, что приводит к простудным заболеваниям, а если  $Q_T < Q_4$  — возрастает частота его дыхания, повышается температура и при длительном сохранении этого условия возникают необратимые изменения в организме человека, приводящие к ухудшению его здоровья.

## **2. Влияние теплового режима на процессы ведения подземных горных работ**

Влияние теплового режима рудничного воздуха сказывается на производительности труда горнорабочих, обеспечении безопасных условий их труда, поддержании устойчивости горных выработок (в условиях многолетней мерзлоты) и технологии разработки месторождений.

С увеличением температуры рудничного воздуха обеспечить баланс между тепловыделением в организме человека и его теплообменом с окружающей средой становится все сложнее. Сбалансировать тепловыделение и теплообмен возможно двумя путями: 1) сокращением тепловыделения горнорабочего за счет увеличения перерывов в работе на отдых, что ведет к снижению производительности его труда; 2) изменением температурного режима рудничного воздуха до нормативных требований, что связано с удорожанием ведения горных работ и не беспредельно по возможностям.

Оптимальным температурным режимом рудничного воздуха следует считать такой, при котором обеспечиваются безопасные условия для здоровья человека, минимальное удорожание горных работ за счет затрат на создание благоприятного микроклимата и максимальная производительность. При оптимизации температурного режима рудничного воздуха, кроме этого, должны быть учтены безопасность и надежность ведения горных работ, а также возможность применения той или иной системы разработки.

Исследованиями установлено, что при скорости движения воздуха в выработках, равной 2 м/с и относительной его влажности равной 0,9, условия труда считаются вредными для здоровья человека, выполняющего тяжелый физический труда, если температура

воздуха превышает 305 К (32°C), а температура стенок выработок — 308 К (35°C). В этих условиях потеря массы тела горнорабочего за смену

достигает 1,9 кг, температура тела — 311,7 К (38,7°C), а частота пульса — до 60. Выполнение тяжелой физической работы при температуре рудничного воздуха от 293 до 302 К (от 20 до 29°C) не сопровождается нарушением кровообращения, дыхания и нервно-мышечной деятельности, однако приводит к усталости и снижению производительности горнорабочих до 27%. Максимальная производительность горнорабочих наблюдается при температуре рудничного воздуха равной 293,3 К (20,3°C).

Проветривание подземных выработок производят не только с целью обеспечения нормативных требований по тепловому режиму рудничного воздуха, но и с целью регулирования газового режима, запыленности воздуха, предотвращения самовозгорания угля и руд, надежности противопожарного водоснабжения и ряда других мероприятий по обеспечению безопасных условий труда.

С повышением температуры массива угольных пластов и углевмещающих пород значительно интенсифицируется процесс сорбции метана. Так, например, при увеличении температуры угля от 273 К до 303 К (от 0 до 30°C) сорбционная способность углей увеличивается примерно в 2 раза.

Повышение температуры рудничного воздуха сопровождается увеличением его запыленности в результате процессов разрушения горных пород. Это приводит к накоплению «рыхлой» пыли на стенках выработок и сужает возможности регулирования скорости движения воздуха для обеспечения нормативных требований по его температурному режиму. В большей степени это проявляется при низкой влажности рудничного воздуха и слабОВОДОНАсыщенных породах. По мере увеличения влажности рудничного воздуха и разрабатываемых пород интенсифицируются процессы седиментации и связывания пыли, что расширяет возможности регулирования скорости движения воздуха, как одного из факторов, оказывающих влияние на параметры теплообмена.

С увеличением температуры рудничного воздуха возрастает интенсивность окислительных процессов при разработке угольных и

сульфидных месторождений. Например, при отрицательной температуре угля возможность его самовозгорания практически отсутству-ет, а при температурах больше 273 К (0°C) это может произойти в течение года.

Охлаждение рудничного воздуха ниже 273 К (0°C) при разработке месторождений в условиях многолетней мерзлоты сопровождается конденсацией водяных ларов, что приводит к интенсивному образованию наледей и снежной «шубы» на стенках выработок. Это увеличивает аэродинамическое сопротивление выработок, затрудняет их проветривание и эксплуатацию. При понижении температуры в условиях вечной мерзлоты газопроницаемость угля снижается, что затрудняет дренирование газа в пластах, приводит к повышению газового давления. Это способствует росту вероятности суффлярных выделений на подмерзлотных горизонтах.

Наряду с этим обеспечить пожарное водоснабжение и электро-безопасность горных работ при разработке месторождений в условиях многолетней мерзлоты значительно труднее, чем при положительны температурах.

Существенное влияние оказывает тепловой режим рудничного воздуха на технологию ведения горны работ при эксплуатации месторождений в условиях многолетней мерзлоты. Это объясняется тем, что при возможном оттаивании пород снижается устойчивость целиков, обнажений и возрастает нагрузка на крепь. В большей степени это относится к выработкам, пройденным по мерзлым рыхлым и связным породам, которые при больших ореолах оттайки могут полностью выйти из строя. В ряде случаев это является основной причиной сезонного ведения горных работ только в периоды года с отрицательной температурой.

При отработке нагорных месторождений подземным способом, особенно в комбинации с открытым, когда горную массу перепускают на нижележащие горизонты, повышается вероятность ее смерзания в магазинах, бункерах, рудоспусках и транспортных сосудах в периоды года с

отрицательными температурами, что влечет за собой увеличение потерь руды, осложняет ее выпуск и транспортировку.

Обеспечить условия по температурному фактору для подземной разработки месторождений в условиях многолетней мерзлоты возможно двумя путями: 1) поддержанием температуры рудничного воздуха выше 273 К (0°C) по всему пути его следования, при этом необходимо усилить крепь и обеспечить теплоизоляцию стенок выработок с целью уменьшения ореола оттайки; 2) подогревом рудничного воздуха до температуры выше 273 К (0°C) непосредственно перед рабочими участками с сохранением допустимой отрицательной его температуры в остальных выработках.

Несмотря на то что регулирование температурного режима рудничного воздуха осуществляют в целях решения многих важных инженерных задач, главной задачей все же является обеспечение санитарно-гигиенических, нормативных параметров микроклимата в подземных выработках, при которых не нарушается нормальная функциональная деятельность организма горнорабочих.

Нормативными требованиями правил техники безопасности при ведении работ в подземных выработках предусмотрено, чтобы при влажности рудничного воздуха 85-98% его температура не превышала 301 К (28°C) при скорости не менее 3 м/с, 300 К (27°C) при скорости не менее 2,5 м/с и 299 К (26°C) при скорости не менее 2 м/с. При скорости движения рудничного воздуха < 2 м/с соответствующие нормативные требования по его температуре и влажности для подготовительных и очистных выработок приведены в табл. 1.

*Таблица 1*

Минимальная скорость движения воздуха, м/с	Допустимая температура рудничного воздуха (°C) при относительной его влажности		
	60—75 %	76—90 %	90%
0.25	24	23	22
0.5	25	24	23
1.0	26	25	24
2,0	26	26	25

Для предупреждения переохлаждения и простудных заболеваний горнорабочих при искусственном охлаждении воздуха, подаваемого в добычные участки, его температура должна быть не менее 295 К (22°C) при скорости 2-4 м/с, не менее 294 К (21°C) при скорости 1,5-2,5 м/с и не менее 293 К (20°C) при скорости 1-2 м/с.

При подземной разработке месторождений в условиях многолетней мерзлоты Севера рациональная температура подогрева воздуха, подаваемого в шахты и рудники, выбирается в каждом конкретном случае.