

## ГЕНЕРАЦИЯ ТЕПЛА В МАССИВЕ ГРУНТА ИЛИ ГОРНЫХ ПОРОД ОТ ОЧАГОВОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛА

д.т.н. Антипов И.В. (ИФГП НАН Украины), инж. Лебедев Н.В.  
(ЗАО «Луганская угольная компания»)

*Рассмотрено влияние изменения теплофизических параметров грунтов и горных пород при генерации тепла от очагового источника тепла. Установлены некоторые закономерности теплопереноса в грунтах и массиве горных пород при изменении теплофизических параметров пород и интенсивности температур.*

Генерация тепла в грунтах и горных породах изучена недостаточно из-за сложности и дороговизны проведения экспериментальных исследований, отсутствия наработанных методик, подходящих измерительных приборов и специфического оборудования. В то же время в литературных источниках прослеживается явный серьезный интерес ученых в потребности достоверных, научно обоснованных данных о поведении горных пород и изменении их теплофизических показателей при генерации тепла в грунтовом массиве и горных породах [2,5,6,7,9]. Особый интерес к этой проблеме возник после Чернобыльской катастрофы, когда нужно было решать инженерные задачи получения безопасного доступа к реактору снизу. За последние годы при освоении подземного городского пространства появились задачи поиска способов защиты подземных сооружений и коммуникаций от влияния тепла под горящими терриконами, домнами, тепло-трассами, другими очаговыми источниками тепловыделения. В связи с постоянным ростом стоимости энергоресурсов все активнее начинает проявляться интерес к более полному использованию бесполезно теряемой энергии.

При добыче угля значительная часть горной массы идет в отвалы, как отходы угледобычи и их складировуют. Складированные отходы угледобычи, имеющие единичные объемы до 3 млн. м<sup>3</sup> и содержащие более 2,5% угля под действием атмосферного воздуха и влаги само окисляются, само нагреваются и самовозгораются. Горение, а точнее тление отвалов длится десятки лет, а температура в очагах горения достигает 1200°C и более, что приводит к интенсивному газовому переносу вредных веществ, формированию многих новых минералов, относящихся к безводным оксидам и силикатам. «Даровая» энергия горящих терриконов не используется, вредные газы и сточные воды загрязняют окружающую среду.

Всем этим и объясняется и обуславливается актуальность пробле-

мы и народно — хозяйственная значимость направления исследований.

Цель работы — исследовать зависимости теплопроводности грунтов и горных пород от основных влияющих факторов и закономерности изменения коэффициента теплопроводности горных пород для дальнейшего математического моделирования процессов тепло и массопереноса т. е. генерации тепла в массиве грунтов и горных пород.

Генерация тепла различного рода тепловыми источниками в массиве грунта и горных пород может осуществляться посредством теплопроводности, излучения и конвекции.

Основным теплофизическим свойством грунтов и горных пород, определяющим тепловой режим массива является их теплопроводность, которая зависит от минералогического состава, структуры, текстуры, объемного веса, давления, пористости, влажности материала и интенсивности температуры.

Влияние минералогического состава, структуры и текстуры горной породы на теплопроводность многообразно. Теплопроводность зависит от крупности минерального состава. При одинаковой плотности и пористости крупнозернистые породы обладают большей теплопроводностью, чем тонкодисперсные, так как в последних больше минеральных частиц, а, следовательно, и контактов между ними, имеющих пониженную теплопроводность.

Например, Ржевский В.В., Новак Г.Я. [6] отмечают, что теплофизические свойства горных пород зависят от поведения минералов, слагающих породу. Разные минералы при высоких температурах ведут себя по-разному. Это осложняет установление закономерности влияния температуры на свойства горных пород

В водо-насыщенных (многофазных) горных породах величина теплопроводности определяется соотношением фаз, их химико-минеральным составом, агрегатным состоянием жидкой фазы и величиной удельной поверхности пород (тонкости частиц в мм).

Горные породы (в частности грунт), как правило, являются плохими проводниками тепла и занимают в общем ряду теплопроводности твердых тел узкую полосу с  $\lambda=(2+18) \cdot 10^{-3}$  кал/см.сек.град. или  $\lambda=(0,84+7,6)$  Вт/(м.<sup>0</sup>С) при комнатной температуре и атмосферном давлении. Следует отметить, что до сих пор теплофизические параметры грунтов и многих горных пород недостаточно изучены. Имеющиеся некоторые данные из-за различий условий испытаний и испытательных приборов не позволяют их использовать в расчетах при изучении генерации тепла в массиве.

Давление, под которым находится грунтовый массив, пористость и плотность горных пород взаимосвязаны. Например, объемный вес породы

(плотность) с увеличением пористости до 40 % уменьшается примерно прямолинейно. При увеличении всестороннего давления пористость уменьшается, а плотность увеличивается, т.е. увеличивается твердая фаза за счет уменьшения пористости. Вследствие увеличения веса твердой фазы в единице объема теплопроводность грунта (или породы) повышается.

Анализ результатов испытаний проведенных нами в лабораторных условиях показали, что теплопроводность осадочных пород объемным весом (плотностью)  $14,0 \leq \gamma \leq 20 \text{ кН/м}^3$  при атмосферном давлении и комнатной температуре ( $18-20^\circ\text{C}$ ) колеблется в первом приближении  $\lambda = (1,4+2,0) \cdot 10^{-3} \cdot \gamma^{3,1}$ . Увеличение плотности грунтов на  $10-50\%$  вызывает повышение теплопроводности, примерно в  $1,5-3,5$  раза.

Некоторые исследователи, в частности, Е.М. Минский [4], И. И. Ротенчук [10], Е.А. Любимова, Г.Н. Старикова, А.П. Шушпанов [3], А.А. Скворцов [8], Б.В. Бриджмен [1], И.И. Fett [1] и др. связывают коэффициент теплопроводности  $\lambda$  с эффективным диаметром породы [4], давлением [8], плотностью [3,11], и даже скоростью звука [10].

Например, Ротенчук И.И. рекомендуют определять коэффициент теплопроводности пород по формуле

$$\lambda = \frac{\beta \gamma^{0,65} U^{3,5}}{T^{1,25}}$$

где  $\beta$ - постоянная;  $U$  – скорость звука; км/сек;  $T$ - температура пород,  $^\circ\text{K}$  или  $^\circ\text{C}$ ;  $\gamma$ - объемный вес (плотность) породы,  $\text{кН/м}^3$ .

Исследования Бриджмена Б.В. [1], показывают, что при высоких давлениях, например,  $1 \leq P \leq 12000$  атм коэффициент теплопроводности подчиняется следующей закономерности

$$\lambda = \lambda_0(1 + \alpha_0 P)$$

где  $\lambda_0$  - теплопроводность пород при 1 атм;  $\alpha_0$  - постоянный коэффициент для заданной температуры, зависит от породы или минерала, например, при температуре  $T=30-75^\circ$ , для базальта  $\alpha_0 = (4,7 \div 2,2) \cdot 10^6$ ; для песчаника -  $\alpha_0 = 12 \cdot 10^6$ ; для известняка  $\alpha_0 = (1,0 \div 6,7) \cdot 10^6$ ; для мела-  $5 \cdot 10^6$  и т.д.

Однако этих данных недостаточно, чтобы однозначно сделать вывод о количественных зависимостях теплопроводности горной породы, в частности грунтов, различного генезиса от давления.

На рис. 1 схематически представлено явление генерации тепла от очагового источника тепловыделения.

Повышение температуры, как правило, снижает теплопроводность сухих пород и кристаллических минералов и повышает теплопроводность аморфных минералов.

На рис. 2 представлены результаты наших исследований теплопроводности некоторых магматических, метаморфических и осадочных пород часто встречающихся под отвалами складированных отходов угледобычи,

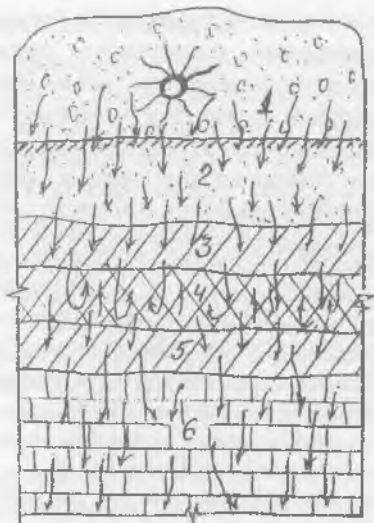


Рис.1. Генерация тепла в массиве грунта и горных пород: 1 - массив складированных отходов угледобычи; 2 - песчаный слой; 3 - глина; 4 - водоносный пласт; 5 - глина; 6 - известняк.

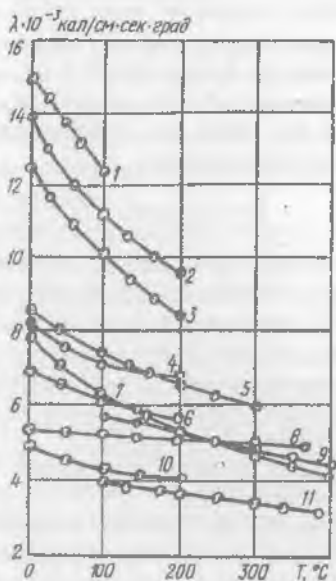


Рис.2. Зависимость теплопроводности грунтов и горных пород от температуры: 1 - кварцит; 2 - песок; 3 - дунит; 4 - известняк; 5 - гранит; 6 - песчаник; 7 - мрамор; 8 - диабаз; 9 - габбро; 10 - сланец; 11 - доломит.

которые являются источником тепловыделения, в зависимости от температуры. В эксперименте давление было равным атмосферному. Анализ исследований показал, что при  $18 \leq T \leq 300^\circ\text{C}$  изменение коэффициента теплопроводности сухих пород и мини-среды может быть выражено приближенной линейной функцией

$$\lambda = \lambda_0 + k(T - T_0)$$

где  $\lambda_0$  - теплопроводность при  $T_0 = 18^\circ\text{C} = \text{const.}$ ;  $k$  - угловой коэффициент, зависящий от породы, определяется испытанием образцов в лабораторных условиях по теплопроводности;  $T$  - изменение температуры.

Учитывая, что при повышении температуры  $T \leq 300^\circ\text{C}$  расширение минеральных частиц осадочных пород (грунтов) происходит в основном в сторону заполнения порового пространства, то влияние изменения температуры на их теплопроводность является весьма незначительным и зависит в основном лишь от давления массива грунта.

Теплопроводность влажных пород в зависимости от насыщенности водой с повышением температуры, может увеличиваться, уменьшаться или оставаться постоянной, тогда как теплопроводность воды с повышением температуры возрастает.

На рис 2 и 3 коэффициенты теплопроводности  $\lambda$  приведены в старой системе измерений специально, так как в этой системе измерений изменение коэффициента  $\lambda$  более наглядно. Переход в систему СИ следует осуществить так:  $1 \text{ кал}/(\text{см}\cdot\text{сек}\cdot^\circ\text{C}) = 4,1868 \cdot 10^2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ .

Теплопроводность многофазных грунтов или горных пород определяется соотношением фаз и их состоянием. При этом увлажнение пород приводит к существенному увеличению их теплопроводности. Это хорошо видно из рис.3, на котором приведены теплопроводности глинистых грунтов.

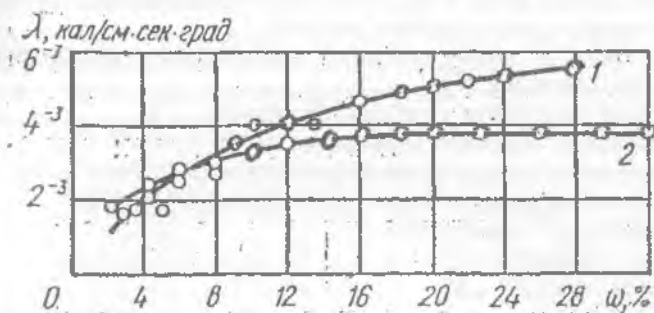


Рис.3. Зависимость теплопроводности краснобурой глины (1) и мергеля (2) от их влажности.

При увлажнении пород в начале увеличение влажности  $W$  происходит за счет адсорбированной воды, что ведет к резкому, практически линейному, повышению коэффициента теплопроводности.

Прирост  $\lambda$  на 1 % влаги больше для пород с меньшей пористостью, так как при равной общей влажности для таких пород характерно повышенное количество адсорбированной воды. При дальнейшем увлажнении пород рост  $W$  происходит за счет свободной воды, вследствие чего скорость увеличения  $\lambda$  уменьшается (рис. 3).

Анализ исследований влияния влажности на теплопроводность некоторых пород показывает, что при атмосферном давлении окружающей среды и  $W \leq 10\%$  имеем:

$$\lambda_w = \lambda_s + k_w W$$

где  $\lambda_s$  - теплопроводность сухой породы;  $k_w$  - угловой коэффициент при влажности  $W$ ;  $W$  - влажность грунта (породы).

Для определения теплофизических свойств грунтов и горных во многих случаях отсутствуют специальные приборы и оборудование. Нами для исследований использовались приборы, предусмотренные для определения теплофизических параметров строительных материалов, на которых испытания пород осуществлялось в сухом состоянии, а специальными коэффициентами учитывалось влияние влажности пород.

Анализ методов определения теплопроводности пород и грунтового массива показал, что наиболее приемлемыми для рассматриваемых условий изучения генерации тепла от очагового источника тепловыделения являются методы регулярного и квазистационарного тепловых режимов с применением эталонов с известными теплофизическими свойствами, которые не зависят от давления окружающей среды. Для этого проводим основные теплофизические параметры некоторых грунтов, которые можно использовать как эталонные для сравнения при испытании других видов грунтов или горных пород и как эталон для математического моделирования теплопереноса в многослойных массивах:

а) для глины в сухом состоянии коэффициент теплопроводности  $\lambda = (0,13 \pm 0,2)$  ккал/(м.ч.°С);

удельная теплоемкость  $c = (0,16 \pm 0,2)$  ккал/(м.ч.°С);

коэффициент линейного расширения  $\alpha = (0,8 \pm 0,94) \cdot 10^{-5} 1/°С$ ;

коэффициент температуропроводности  $a_t = (0,8 \pm 0,92) \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{ч}$ ;

б) для чистого кварцевого песка  $\lambda = (5 \pm 10,3)$  ккал/(м.ч.°С);

$c = (50,11 \pm 0,17)$  ккал/(кг.°С);

$\alpha = (1,2 \pm 1,38) \cdot 10^{-5} 1/°С$ ;

$a_t = (1,86 \pm 1,94) \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{ч}$ ;

Переходные коэффициенты в систему СИ -  $\lambda = 1 \text{ ккал} / (\text{м.ч.} \cdot °С) = 1,163 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot °С)$ ;  $C = 1 \text{ ккал} / (\text{кг} \cdot °С) = 4,1868 \cdot 10^3 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot °С)$

в) для воды  $\lambda = 0,5$  ккал/(м.ч.°С);

$c = 1$  ккал/(кг.°С).

г) для воздуха:  $\lambda = 0,198$  ккал/(м.ч.°С);

$c = 0,24$  ккал/(кг. °С).

Генерация тепла от самовозгорающихся складированных отходов угледобычи в грунтовой массив (ниже отвальной породы) определяется геотермическими режимами массива посредством теплопроводности грунта излучением и конвекцией (рис. 1).

Нестационарный процесс трехмерной теплопроводности грунтового массива при наличии источников очагового тепла можно описать следующим уравнением теплопроводности:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + P(x, y, z, \tau)$$

где  $\rho$  - плотность; кН/м<sup>3</sup>;  $c$  - теплоемкость;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности;  $P$  - генерация тепла в единице объема;  $\tau$  - время протекания процесса.

Коэффициент теплопроводности грунтов и горных пород зависит также от интенсивности температур, мигрирующих на грунт (породы). До температуры 800 °С справедливо соотношение

$$\lambda = \lambda_0 \frac{T_0}{T}$$

где  $T_0$  - температура, при которой определено значение  $\lambda_0$ .

При высоких температурах значительное количество тепла переносится излучением. В этом случае нагретые породы (или грунт) излучают энергию, которая распространяется на некоторое расстояние до полного поглощения, в связи с чем повышается значение суммарного коэффициента теплопроводности породы.

От самовозгорания массива складированных отходов угледобычи температура может нагревать грунтовые воды и заставлять двигаться горячую воду в порах или трещинах грунтового массива или горных пород. В таком случае формируется теплопередача движущейся массы посредством конвекции. Тогда уравнение теплопереноса при совместном действии теплопроводности и конвекции имеет такой вид:

$$\rho c \left( \frac{\partial T}{\partial \tau} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + P(x, y, z, \tau) - V_x \rho c \frac{\partial T}{\partial x} - V_y \rho c \frac{\partial T}{\partial y} - V_z \rho c \frac{\partial T}{\partial z}$$

где  $V_x, V_y, V_z$  - составляющие скорости движения по соответствующим координатам.

Следует отметить, что конвективный теплоперенос играет значительную роль в перераспределении теплового потока в водо-насыщенных

грунтах, и его следует обязательно учитывать при решении задачи извлечения тепла из самовозгорающихся складированных отходов угледобычи с применением горнопроходческих способов.

Учитывая, что вода обладает большой теплоемкостью и роль ее как теплоносителя, перераспределяющего тепловой поток очень велика, в дальнейшем мы предполагаем использовать воду, как теплоуловитель для создания приборов по извлечению тепла из самовозгорающихся отвалов.

### Выводы:

Проведенные экспериментальные и теоретические исследования позволяют высказать следующую рабочую гипотезу о генерации тепла в грунтах и горных породах от очагового источника тепла:

1. Генерация тепла различного рода тепловыми источниками в массиве грунта и горных пород может осуществляться посредством теплопроводности, излучения и конвекции.

2. Теплопроводность грунта и горных пород при генерации тепла зависит от многих факторов (влажности, давления, плотности, пористости, структуры и текстуры, минеральных фаз, гранулометрических состав, интенсивности температуры и т.д.), которые необходимо учитывать при моделировании процессов тепло массопереноса.

3. Закономерности изменения коэффициента теплопроводности грунтов и горных пород в сухом состоянии при температурах до 300 °С для практических расчетов можно принимать линейными, а при увлажнении массива и при дальнейшем росте температуры эти закономерности становятся экспоненциальными.

4. Генерация тепла в массиве грунта и горных пород протекает в стационарном и нестационарном режимах и может быть описана приведенными уравнениями теплопроводности и конвективного теплопереноса

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бриджмен Б.В. Физика высоких давлений. Изд-во Ин.лит. М.: 1935-156с.
2. Воропаев А.Ф. Управление тепловым режимом на глубоких шахтах. М.: Госгортехиздат, 1961-150с.
3. Любимова Е.А., Старикова Г.Н., Шушпанов А.П. – Вкн.: Геотермические исследования М.: Наука, 1964-с.68-76.
4. Минский Е.М. –В. Кн.: Вопросы добычи, транспорта и переработки природных газов. Гос.научно-техн. изд-во нефтяной и горючепромышленной литературы, М.: 1961.-с. 41-49.
5. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций. М.: «Мир», 1968-220с.
6. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. Изд. «Недра», М.: 1973-238 с.
7. Самедов А.М. Деформирование и разрушение конструкций при термосиловых воздействиях. М.: Стройиздат, 1989-432 с.



8. Скворцов А.А. — В.кн.: Труды ЛИТМО, 21, Л.: 1957 с. 36-42.
9. Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов изд. М: Недра, 1962-210 с.
10. Potemanchuk I. I. Phys. Ac. Sci. UGSR, 1943- 7- 85
11. Fatt I I Petroleum Technology, October, 1953—p56-68.