

Пещера Мраморная является уникальным памятником природы, действенная охрана ее и эксплуатация стали возможны только благодаря энтузиазму сотрудников «Оникс-тура». Исследования этой полости необходимы для создания комплекса мероприятий по охране ее и аналогичных пещер, которые с течением времени будут вводиться в эксплуатацию как в Украине, так и в странах СНГ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

I.A.V.Klimchouk, V.V.Gudzenko. Chernobyl radiocaesium in a karst sistem, Marble Cave, Crimea. Int. Journal of Geosciences "Environmental Geology", 28(3), 1996, p.161-166.

УДК 622.413.2:622.272.332

В.Г. Кравец, А.М. Самедов, И.В. Ивкина, Р.Р. Самедова

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА В ПОРОДНОМ МАССИВЕ

Передача тепла от источника в массиве может осуществляться посредством теплопроводности, излучения и конвекции. Величина коэффициента теплопроводности зависит от вида грунта, влажности, температуры нагрева и давления.

При высоких температурах значительное количество тепла переносится излучением. В этом случае нагретые породы излучают энергию, которая распространяется на некоторое расстояние до полного поглощения, в связи с чем повышаются значения суммарного коэффициента теплопроводности. Эти рассуждения справедливы в тех случаях, когда отсутствует массоперенос.

Учитывая, что вода обладает большой теплоемкостью, во влажных и водонасыщенных грунтах происходит интенсивное распространение теплового потока путем массопереноса, причем вода в составе грунта играет роль теплоносителя, перераспределяющего тепловой поток между частицами грунта. Это вызывает необходимость учета конвективного теплопереноса, осуществляемого при движении подземных вод. Величина конвективной составляющей теплопереноса в водонасыщенных грунтах во многом зависит от температуры воды и составляет более 60% суммарного теплового потока.

Тепловой поток (количество тепла, передаваемое через единичное сечение грунтового массива в единицу времени) является величиной, характеризующей про-

течение термофизических процессов и определяющей тепловой баланс в грунтовом массиве.

В монолитных или сухих кристаллических массивах горных пород, где отсутствует движение воды, можно считать, что теплопередача осуществляется только теплопроводностью. Тогда теплопередачей за счет конвекции можно пренебречь. Это позволяет упростить расчеты, так как величину теплового потока можно определить следующей формулой

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \quad (1)$$

где λ - коэффициент теплопроводности; $\frac{\partial T}{\partial z}$ - температурный градиент; z - ось, направленная вниз по нормали к поверхности.

Из выражения (1) видно, что при расчете теплового потока в сухом грунтовом массиве необходимо определить значения λ и $\frac{\partial T}{\partial z}$. Значения λ для различных грунтов в сухом, влажном и водонасыщенном состоянии при 20°C исследованы и приведены в таблице I.

Температурный градиент непосредственно не измерим, поэтому его приходится заменить конечно-разностной формой в следующем виде:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\Delta T}{\Delta z} = \frac{T_2 - T_1}{z_2 - z_1} \quad (2)$$

Результаты, полученные по выражению (2), тем точнее, чем ближе друг к другу находятся точки измерения температур T_1 и T_2 на глубинах грунтового массива z_1 и z_2 . Таким образом, задача сводится к измерению температуры в наблюдательных скважинах и коэффициентов теплопроводности образцов грунтов, отобранных из скважин.

В породных массивах, где происходит движение воды, теплопередача осуществляется одновременно теплопроводностью и конвекцией, т.е.

$$q_x = \rho C V_x T - \lambda \frac{\partial T}{\partial x};$$

$$q_y = \rho C V_y T - \lambda \frac{\partial T}{\partial y};$$

$$q_z = \rho C V_z T - \lambda \frac{\partial T}{\partial z}; \quad (3)$$

где ρ - плотность; C - теплоемкость; V_x, V_y, V_z - составляющие скорости движения воды по соответствующим координатам (скорость фильтрации); T - температура в центре скважины в момент времени t при установившемся температурном режиме, которое можно принимать в следующем виде

$$t = t_1 \frac{\lg(T - T_{cp}) - \lg(T_0 - T_{cp})}{\lg(T_1 - T_{cp}) - \lg(T_0 - T_{cp})} \quad (4)$$

где T_0 - начальная температура скважины; T_{cp} - температура окружающей среды; T_1 - температура в центре скважины в момент времени t_1 .

В случаях малых фильтраций в грунтовом массиве, особенно в глинистых грунтах, можно допустить, что температура воды и скелета грунта в каждой точке совпадает. Тогда уравнение теплопереноса при установившемся режиме с учетом конвекции можно записать в следующем виде

$$\frac{\partial^2 T_w}{\partial z^2} - \frac{\rho_w C_w V}{\lambda_w} \cdot \frac{\partial T_w}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

где T_w и λ_w - соответственно температура и коэффициент теплопроводности водонасыщенного грунта; C_w и ρ_w - соответственно теплоемкость и плотность воды; V - постоянная скорости фильтрации. Ось z направлена вниз по глубине грунтового массива.

При условии $z = z_1, T = T_1, z = z_2, -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = q_1$, где q_1 - тепловой поток в грунтовом массиве, передаваемый за счет теплопроводности. Решение уравнения (5) можно записать в следующем виде

$$T = T_1 + \frac{q_1}{A \lambda_w} e^{A(z_1 - z_2)} \left[e^{A(z - z_2)} - 1 \right], \quad (6)$$

где $A = \frac{\rho_w C_w V}{\lambda_w}$ - характеризует тепловой процесс нагретой воды в грунтовом массиве.

Из вышесказанного вытекает, что учет движения воды в полупроницаемых пластах может внести значительную ошибку при определении теплопроводности в водонасыщенных грунтах.

В силу большой теплоемкости ($C_w=1,5$ кДж/(м³°С)) вода несет значительное количество тепла. Суммарный тепловой поток равняется алгебраической сумме теплопроводной и конвективной составляющих, направления которых могут совпадать или быть противоположными.

Значения теплового суммарного потока, когда известны температура и теплопроводная составляющая теплового потока или два значения температуры грунтового массива и их координаты, коэффициент теплопроводности пласта и скорость фильтрации определяется следующей формулой.

$$q_{\Sigma} = \rho C V T_1 - q_1 e^{\frac{\rho C V}{\lambda}(z_1 - z_2)}$$

или

$$q_{\Sigma} = \rho C V T_1 - \rho C V \frac{T_2 - T_1}{e^{\frac{\rho C V}{\lambda}(z_1 - z_2)}} \quad (7)$$

Следует отметить, что коэффициент теплопроводности грунта зависит главным образом от температуры нагрева. До температуры 1000°С справедливо соотношение

$$\lambda_T = \lambda_0 \frac{T_0}{T} \quad (8)$$

где T_0 - температура, при которой определено значение λ_0 ; λ_T - коэффициент теплопроводности грунта при температуре T .

При анализе теплообменных процессов в массиве часто требуется определить количество тепла, переданное от теплоносителя массиву, как произведение разности температур между теплоносителем и массивом. Это выполняется с помощью коэффициента теплоотдачи.

Коэффициент теплоотдачи $\alpha_{отд}$, Вт/(м²°С), представляет собой количество тепла, переданное в единицу времени от теплоносителя к грунту площадью 1 м² при разности температур 1°С. Обратная коэффициенту теплоотдачи величина, т.е. $1/\alpha_{отд} = R_{отд}$, (м²°С)/Вт называется сопротивлением теплоотдачи от теплоносителя к поверхности грунта.

Коэффициент теплоотдачи $\alpha_{отд}$ зависит от физических свойств теплоносителя, его температуры и скорости движения. В грунтовой среде теплоносителем может быть нагретая вода, водяной пар, дымовые газы из тепловых аппаратов, взрывные газы, имеющие большие скорости движения. Коэффициент теплоотдачи состоит из двух слагаемых - коэффициента теплоотдачи конвекцией и коэффициента теплоотдачи излучением. Суммарный коэффициент теплоотдачи поверхности грунта на-

ружному воздуху при 20°C колеблется от 15 до 20 Вт/(м²°С). При этом коэффициент теплоотдачи воздуха составляет 6-9 Вт/(м²°С).

Таким образом, измеряя теплофизические показатели породного массива, температурные перепады по толщине массива можно составить и решить уравнение теплопереноса. Проанализированы теплообменные процессы как в сухом так и в водонасыщенном грунте, даны оценки учета составляющих компонентов в виде излучения и конвекции.

Таблица I – Теплофизические показатели грунтов при T=20°C

Классификация грунтов по влажности	Вид грунта	Средняя плотность сухого, ρ кН/м ³	Абсолют. влажность $W_{об}$, %	Теплопроводность, с учетом влажнос., C , Вт/м ² °С	Теплоемкость, с учетом влажнос., C , кДж/кг°С	Скорость вертикальной фильтрации, K_f , см/сек
Сухие	глины, супеси, суглинки	16-20	0	0,84-0,92	0,76-0,80	$1,2 \cdot 10^{-6}$ $3,1 \cdot 10^{-4}$ $1,4 \cdot 10^{-4}$
	пески и песчаные грунты	16-20	0	0,95-1,2	0,78-0,82	$1,2 \cdot 10^{-3}$ $6,6 \cdot 10^{-2}$
	скальные	20-24	0	1,6-1,8	0,80-0,84	$5,1 \cdot 10^{-2}$ $4,5 \cdot 10^{-1}$
Маловлажные	глины, супеси, суглинки	16-20	5	0,87-1,6	0,81-0,84	-
	пески и песчаные грунты	16-20	5	1,1-1,95	0,85-0,90	-
	скальные	20-24	5	2,0-2,33	0,88-0,92	-
Влажные	глины, супеси, суглинки	16-20	10	1,7-2,0	0,90-1,0	-
	пески и песчаные грунты	16-20	10	1,8-2,8	0,94-1,1	-
	скальные	20-24	7	2,5-3,1	0,96-1,2	-
Водонасыщенные	глины, супеси, суглинки	16-20	22	2,4-2,6	0,9-1,2	-
	пески и песчаные грунты	16-20	22	2,3-3,1	0,96-1,3	-
	скальные	20-24	12	3,3-4,6	1,2-1,4	-