

**Завьялова Е.Л., Чепак О.П.**

**Донецкий национальный технический университет**  
**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ**  
**ВОССТАНОВЛЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОГО**  
**РАЗНООБРАЗИЯ В ВЫРАБОТАННОМ**  
**ПРОСТРАНСТВЕ КАРЬЕРОВ**

*Установлены закономерности теплообмена между породным массивом и водной средой при использовании геотермальных теплообменников в биоочистном сооружении, которые позволили определить его основные параметры (количество скважин и их глубину) для поддержания температуры 10°C в зимний период.*

На сегодняшний день в горнодобывающей промышленности существует ряд экологических проблем. Одна из них – восстановление биоразнообразия карьерного пространства при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом.

Горнодобывающие работы убивают растения, изменяют микроценоз, разрушают плодородный слой, консументы лишаются мест своего обитания из-за нарушения пищевой цепочки и условий жизни в целом.

Ускорить процесс формирования биогеоценоза в выработанных пространствах карьеров можно только создав для этого необходимые гидрогеологические условия. Авторами предложен способ, позволяющий ускорить восстановление биологического разнообразия в выработанных пространствах карьеров путем очистки атмосферы и гидросферы, возрождения флоры и фауны на основе круглогодичного управления состоянием потоков карьерных вод за счет использования геотермальной энергии [1].

Основной водоприток в карьер происходит из водоносного горизонта, который показан с левого борта карьера (рис. 1). Выработанное пространство схематично представлено в

виде прямоугольника. В центре выработанного пространства располагается основная дамба, сооружаемая из железобетона или насыпная, из не склонных к размоканию материалов.

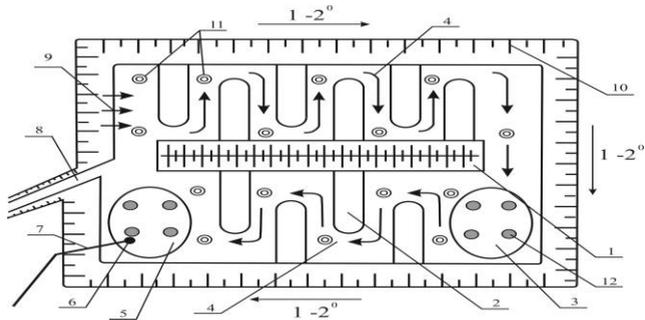


Рис. 1 – Схема сооружения для очистки воды карьера с использованием геотермальной энергии.

1 – основная дамба; 2 – дополнительные дамбы; 3 – отстойник №1; 4 – русло; 5 – основной отстойник; 6 – насос; 7 – труба для откачивания воды; 8 – въездная полутраншея; 9- водоприток; 10 – борт карьера; 11 – вертикальный скважинный коллектор «труба в трубе»; 12 – скважины, заполненные теплопроводной смесью.

Для увеличения длительности прохождения воды через выработанное пространство, тем самым увеличения степени очистки воды, созданы основная и вспомогательные дамбы. В областях расположения дамб предусмотрено образование болотистой среды с обильной растительностью. Для минимизации эрозии и вымывания почвы поверхность дамб засеивается растениями.

Основная идея низкочувствительной фитотехнологии очистки сточных вод состоит в использовании природных элементов, которые используют для своего функционирования солнечную энергию и не нуждаются в обслуживании.

К дискуссионным вопросам, связанным с эксплуатацией сооружений фитотехнологии, относится зимний режим. Чтобы избежать снижения эффективности очистки воды в зимний период, необходимо поддержание температуры воды в очистном сооружении на уровне 10°C...12°C.

Для круглогодичной очистки воды по руслу водотока справа и слева от вспомогательных дамб предлагается пробурить скважины, располагая в них вертикальный скважинный коллектор «труба в трубе». Вода из водоносного горизонта, попадая в межтрубное пространство, по мере продвижения нагревается в результате теплообмена с вмещающими породами через стенку трубы.

Поддержание необходимой температуры воды в биоочистителе круглый год предотвратит промерзание мелководных потоков, обеспечит круглогодичную очистку воды и атмосферы.

Для определения параметров технологии восстановления биологического разнообразия в выработанных пространствах карьеров был произведен тепловой расчет.

Схема однотрубного геотермального теплообменника имеет следующий вид (рис. 2).

Коаксиальный теплообменник включает в себя скважину с помещенным в неё стальным цилиндрическим кожухом диаметром  $D$ , закрытым снизу. В этом кожухе коаксиально размещена труба из специального плохо проводящего тепло материала (например, пластик), диаметром  $d$ , открытая снизу. Вода, опускаясь по кольцевому каналу вниз, нагревается земным теплом. Нагретая вода поднимается по внутренней трубе вверх на поверхность земли.

Такая конструкция является экологичной, поскольку структура глубинного грунта не затрагивается. Очевидно, что от поверхности земли до некоторой глубины окружающие слои земли будут холоднее, чем вода, и будет происходить потеря тепла. Для предотвращения этой потери необходима частичная теплоизоляция стального кожуха. На оставшейся части длины коллектора пространство между стенкой скважины и поверхностью кожуха заполняется для улучшения теплообмена глино-графитной смесью, теплопроводность которой выше теплопроводности вмещающих пород.

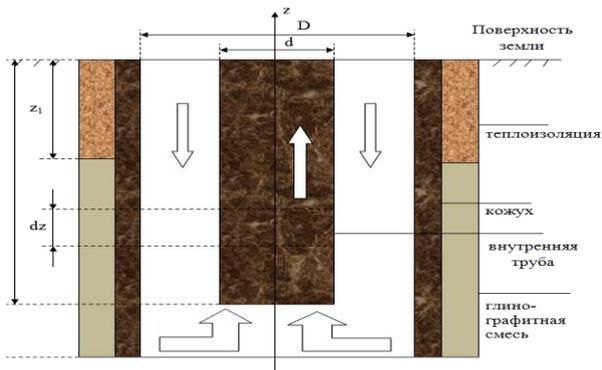


Рис. 2 – Схема теплообмена в геотермальной скважине

Принимаем следующие допущения:

1. Теплообменом между слоями воды вдоль оси  $z$  пренебрегаем.
2. Теплообменом через внутреннюю трубу пренебрегаем, т.е. считаем температуру нагретой воды постоянной,  $T_2 = \text{const}$ .
3. Температура внешней поверхности скважины является постоянной и равной температуре грунта  $T_r$ , соответствующей глубине бурения.
4. Температура грунта является постоянной (восстанавливается за счет геотермальной энергии).

В соответствии с этими допущениями задача теплообмена является стационарной.

Выделим элементарный участок  $dz$  на кольцевом канале скважины. Количество тепла, попадающее через выделенный кольцевой зазор от грунта к воде:

$$dQ = \pi Dk(T_r - T)dz, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи,  $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$ ;  $T = T(z)$  – текущая температура воды.

Это же количество тепла поглощается водой

$$dQ = cMdT, \quad (2)$$

где  $M$  – расход воды,  $\text{кг}/\text{с}$ ;  $c$  – удельная теплоемкость воды,  $\text{Дж}/\text{кг} \cdot \text{К}$ .

$$M = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)\rho v, \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность воды,  $\text{кг/м}^3$ ;  $v$  – скорость течения воды по кольцевому зазору,  $\text{м/с}$ .

Сравнивая (1) и (2), имеем

$$dT = \frac{\pi Dk}{M} (T_2 - T) dz. \quad (4)$$

Принимаем, что температура грунта изменяется по линейному закону:

$$T_2 = T_{z0} + \text{grad}T_2 \cdot z, \quad (5)$$

где  $T_{z0}$  – температура поверхности земли,  $\text{К}$ ;  $\text{grad}T_2$  – температурный градиент грунта,  $\text{К/м}$ ;  $z$  – расстояние от поверхности земли,  $\text{м}$ ;  $z > z_1$  – глубина, до которой температура грунта остается постоянной (для условий Донбасса  $z_1 = 15 \text{ м}$ ;  $T_2 = T_{z0}$ ).

Обозначим комплекс  $A = \frac{\pi Dk}{Mc}$ , тогда

$$dT = A(T_{z0} + \text{grad}T_2 - T) dz, \quad (6)$$

$$\frac{dT}{dz} + AT = A(T_{z0} + \text{grad}T_2 \cdot z). \quad (7)$$

Это нелинейное дифференциальное уравнение, его решение позволит определить текущую температуру нагреваемой воды:

$$T = T_{z0} + \frac{\text{grad}T_2}{A} \cdot (Az - 1) + \left( T_1 - T_{z0} \frac{\text{grad}T_2}{A} \cdot (Az_1 - 1) \right) \cdot e^{-A(z_1 - z)} \quad (8)$$

Глубину изоляции определим из условия равенства температур грунта и воды:

$$\text{при } z = z_1 \quad T_1 = T_{z0} + (\text{grad}T_2) \cdot z_1; \quad (9)$$

$$z_1 = \frac{T_1 - T_{z0}}{\text{grad}T_2} \quad (10)$$

Задаваясь температурой нагрева воды  $T = T_2$ , определяем требуемую длину внутренней трубы  $z_2$ , решая неявное уравнение:

$$T_2 = T_{z_0} + \frac{gradT_z}{A} (Az_2 - 1) + \left( T_1 - T_{z_0} \frac{gradT_z}{A} (Az_1 - 1) \right) \cdot e^{-A(z_1 - z_2)} \quad (11)$$

Определим основные параметры биоочистного сооружения на примере карьера «Балка Мокрая» ПАТ «ХайдельбергЦементУкраина». Среднесуточный расход воды в карьере  $Q=660 \text{ м}^3/\text{сут}$ . Принимаем следующие допущения. Вода проходит по дну карьера и частично нагревается в скважинах до температуры  $T_2=12 \text{ }^\circ\text{C}$ , имея начальную температуру  $T_1=7 \text{ }^\circ\text{C}$ . В целом вода в карьере нагревается до температуры  $T_{cp}=10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Находим требуемый расход воды через скважины:

$$Q \cdot T_{cp} = Q_1 \cdot T_2 + (Q - Q_1) \cdot T_1$$

$$Q_1 = Q(T_{cp} - T_1) / T_2 = 396 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

Принимаем  $N=24$  скважин, значит, расход через одну скважину составит  $q=16,6 \text{ м}^3/\text{сут} = 2,92 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ , а массовый расход  $M=0,192 \text{ кг/с}$ .

Расчеты по уравнениям (15) и (16) для этих данных позволили получить изменение температуры в зависимости от глубины скважины при использовании глино-графитной смеси и без нее (рис. 3) [2].

Таким образом, для нагрева воды до той же температуры при использовании глино-графитной смеси в качестве заполнителя затрубного пространства требуется скважина длиной в 1,7 раза меньшей, чем в случае непосредственного контакта стального кожуха с вмещающими породами.

Согласно проведенным расчетам, для нагрева  $660 \text{ м}^3/\text{сут}$  воды за счет геотермальной энергии до температуры  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  необходимо пробурить 24 геотермальных скважины диаметром 200 мм и длиной 76 м.

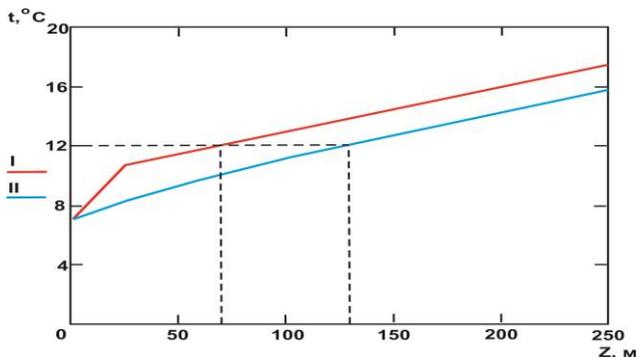


Рис. 3 – Изменение температуры воды по глубине скважины с использованием глино-графитной смеси (I) и без использования глино-графитной смеси (II)

Последние необходимо оснастить теплоизоляцией из пеностекла толщиной 20 мм на глубину 25 м, а затем установить стальной кожух из стали 4Х13 с толщиной стенки 20 мм, а коаксиально с ним пластиковую трубу диаметром 50 мм и длиной 75 м. Пространство между кожухом и массивом на участке от 25 до 75 м заполняется глино-графитной смесью с содержанием графита 50% мас.

При этом через скважины будет проходить  $396 \text{ м}^3/\text{сут}$  воды. Температура воды на выходе составит  $12 \text{ }^\circ\text{C}$ . Перемешивание с оставшейся частью воды позволит поднять температуру последней в карьере до  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### Библиографический список

1. Костенко В.К. Восстановление биологического разнообразия в выработанных пространствах карьеров/ В.К. Костенко, Е.Л. Завьялова, О.П. Чепак // Проблемы недропользования: междунар. форум-конкурс мол. уч., 23-25 апреля 2014 г.: сборник науч. тр. Часть II. – Санкт-Петербург, 2014. – С. 131 – 133.
2. Патент на корисну модель № 91730 Україна, МПК F24J3/08. Спосіб видобування геотермального тепла / В.К. Костенко, О.Л. Зав'ялова, І.В.Скринецька, О.С. Шипика, О. П. Чепак, Ю. І. Філатов; заявник і власник ДонНТУ. – № u2014 02110; заявл. 03.03.2014; опубл. 10.07.2014, Бюл. №13.