

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ТЕПЛОТЫ ТЕРРИКОНОВ

Наведено математичну модель тривалого видобування теплоти з ґрунту та атмосфери трубопровідною системою мілкового закладання, по якій прокачується вода з антифризом. Строк окупності таких технічних рішень не більше трьох років.

Представлена математическая модель длительного извлечения теплоты ґрунта и атмосферы трубопроводной системой мелкого заложения, по которой прокачивается вода с антифризом. Показано, что срок окупаемости таких технических решений порядка трех лет.

Will presented mathematical model of the long extraction of the heat of the soil and atmosphere by pipe-line system of the small pawning, on which is zorched water with antifreeze. It is shown that pay-back period such technical decisions of the order three years.

A – параметр;
 a – коэффициент температуропроводности;
 c – удельная теплоемкость;
 h – толщина теплопроводного слоя;
 q – плотность теплового потока;
 L – толщина слоя постоянной температуры;
 N – мощность;
 R – радиус теплообменника;
 T – температура;
 t – время;
 Z – глубина заложения;

Γ – годы.
Индексы:
 0 – на наружной поверхности теплообменника;
 $0,2$ – на глубине 0,2 м от поверхности ґрунта;
 a – атмосфера;
 c – середина;
 m – массив;
т.н. – тепловой насос;
 s – поверхность;
 z – глубина.

В связи с наступлением энергетического и экологического кризисов все большую актуальность приобретают решения, направленные на использование нетрадиционных источников энергии. Одним из таких решений является извлечение низкопотенциальной теплоты из естественных накопителей солнечной энергии (ґрунт, воздух, вода) с последующим повышением температуры тепловыми насосами. Поскольку порог потенциала последних не превышает $65\text{ }^\circ\text{C}$, то такую теплоту рационально использовать для коммунальных нужд – отопления по схеме “теплый пол” и горячего водоснабжения. Во избежание нарушения климатической обстановки недопустимо извлекать теплоту в количествах, превышающих ее естественную компенсацию за счет солнечной радиации. Украина расположена в солнечно благоприятной зоне.

Однако необходимо принимать во внимание полугодовой сдвиг между наибольшей интенсивностью инсоляции и коммунальным теплотреблением. Поэтому теплоту приходится извлекать в осенне–зимний период с последующим восстановлением в теплое время года.

Естественным повсеместным аккумулятором солнечной энергии является ґрунт. Однако из-за его низкой теплопоглощающей способности – порядка $10\text{...}35\text{ Вт/м}^2$, что соответствует $5\text{...}15\%$ от падающей радиации, требуются большие площади, а это для урбанизированой Украины проблематично. В восточных районах нашей страны имеются неиспользуемые участки – терриконы и отвалы пустой породы [1]. Только в Луганской области это 3180 га земли и 984 га шлаконакопителей. В Донецком каменноугольном бассейне насчитывается 1185 действующих и “отслужив-

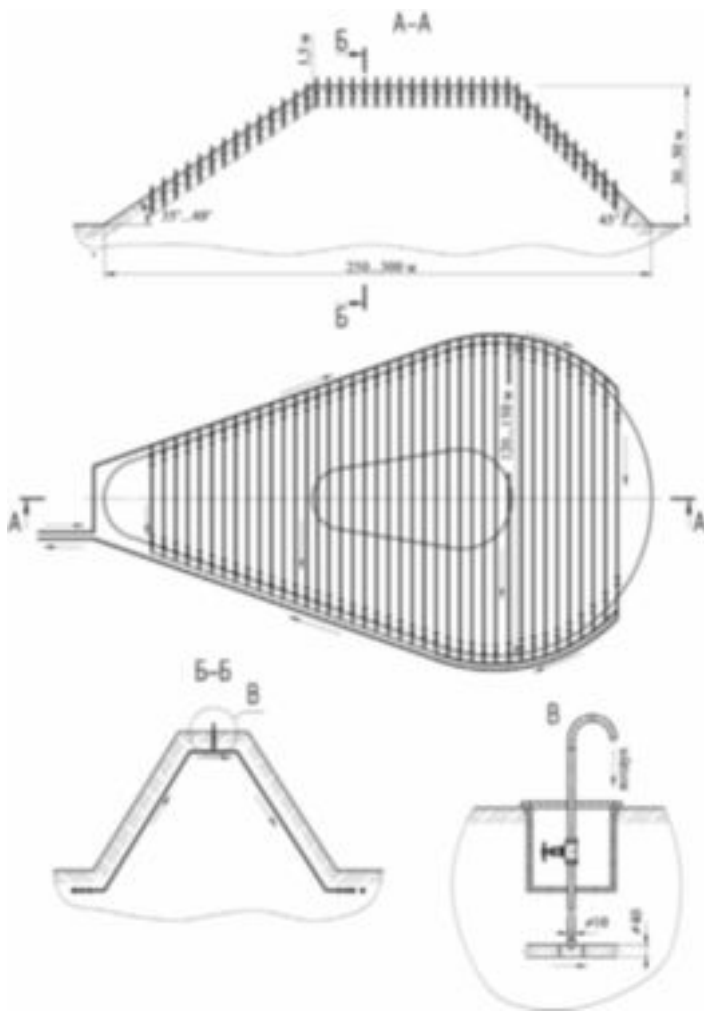


Рис. 1. Схема трубопроводной сети, прокладываемой в теле террикона на глубине 1,5 м.

ших” отвалов и терриконов. Типичный террикон это конусоподобная насыпь высотой до 60...100 м с углом отсыпки 35...40°, грушеподобной формы в горизонтальном сечении с габаритными размерами у основания 120...150 м и 250...300 м (см. рис. 1). Нередко для организации отвалов используют естественное углубление на поверхности земли, которое засыпают отходами производства. Тогда это практически плоская поверхность. Терриконы и отвалы можно разделить на две группы: а) с выделением теплоты экзотермических реакций и б) при отсутствии последних. На участках первой группы нередко происходят самовозгорания и даже выбросы. Таким образом, они являются не только аккумуляторами солнечной энергии, но и дополнительными источниками техногенной теплоты,

которую с точки зрения безопасности даже необходимо отводить.

Техническое решение по извлечению теплоты предлагается следующим (см. рис. 1). По всей поверхности террикона (или отвала) на глубине порядка 1,5 м прокладывается сеть из полимерных труб диаметром 40 мм из расчета 1,5...2 м трубы на 1 м² поверхности террикона (или отвала). Трубная система разделяется на участки до 100 м. При необходимости участки снабжаются отключающими их от сети вентилями. Сеть имеет воздуховыпускные устройства. По трубам прокачивается вода с антифризом, являющаяся промежуточным теплоносителем. Для равномерного распределения теплоносителя по сети необходимо стремиться, по возможности, к одинаковой протяженности перемещения теплоносителя, поступающего в каждую ветвь. Температура воды понижается в процессе полугодовой откачки до минус 10...20 °С. Промежуточный теплоноситель отдает теплоту камере испарения теплового насоса, который поддерживает потенциал основного теплоносителя на уровне 60...65 °С.

Расчетная схема представлена на рис. 2. Извлекаемый трубной системой тепловой поток q_s , приходящийся на единицу поверхности террикона (отвала), складывается из а) теплопотока q_m от грунтового массива ниже глубины $(Z + 0,5L)$, б) теплопотока q_a от атмосферы и в) изменения теплосодержания грунтового массива q_z толщиной L и выше глубины $(Z - 0,5L)$. Ниже учитывается, что из-за малой тепловой проводимости грунта ($\lambda_m \sim 1 \text{ Вт/м}^2$) и высокой объемной теплоемкости ($\rho_m c_m \sim 10^6 \text{ Дж/(м}^3\text{К)}$) его тепловые параметры (q, T) мало изменяются во времени. Поэтому, в первом приближении, при составлении зависимостей для q_m и q_a можно пользоваться зависимостями для установившихся тепловых процессов. Согласно изложенному уравнение теплового баланса:

$$q_s = \frac{d}{dt} \left\{ \rho_m c_m \left[(T_z(0) - T_c) L + 0,5(T_{0,2} - T_c) h \right] \right\} + \frac{\lambda_m (T_m - T_c)}{\sqrt{a_m t}} + \frac{\lambda_m (T_{0,2} - T_c)}{h}, \quad (1)$$

где

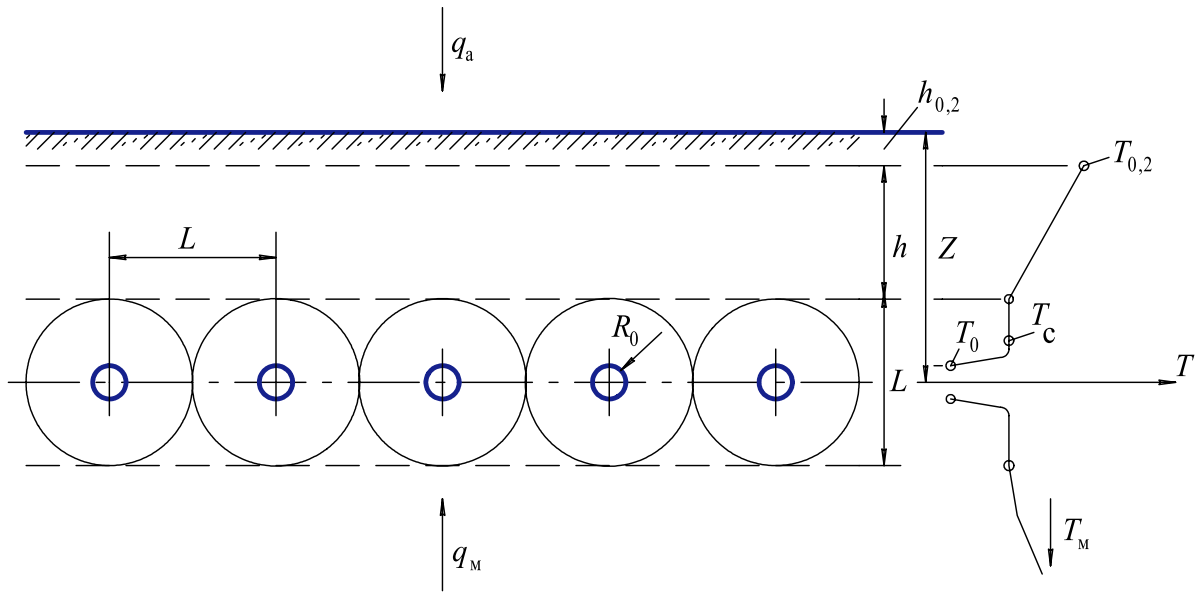


Рис. 2. Расчетная схема трубной системы мелкого заложения.

$$h = Z - 0,5L - 0,2 .$$

Здесь слагаемые правой части (1) последовательно соответствуют q_z , q_m , q_a . Величина $T_z(0)$ равна исходной температуре грунта на глубине Z в начальный момент ($t = 0$) извлечения теплоты. Величина $T_{0,2}(t)$ – это температура грунта на глубине $0,2$ м от поверхности. Значения $T_z(0)$, $T_{0,2}(t)$ определяются согласно справочным данным Гидрометеослужбы для данной местности [2]. Обычно приводятся среднемесячные значения температур. Если отнести их к середине соответствующего месяца, то легко получить аппроксимации среднесуточных изменений температур на весь период извлечения теплоты, который в условиях Украины соответствует 180 дням – напри-

мер, от 15 октября по 15 апреля. Выбор $T_{0,2}(t)$ обусловлен первым по глубине грунта регистрируемым значением температуры. Из-за высокой подвижности и большой массы атмосферного воздуха умеренный отбор теплоты ($q_s = 10...35$ Вт/м²) на глубине Z окажет малое влияние на приповерхностные значения $T_{0,2}(t)$. По сути, величина q_a отражает тепловой вклад атмосферы, действие которой и стабилизирует значение $T_{0,2}(t)$.

После дифференцирования по времени первого члена правой части (1) и простых преобразований получаем уравнение, определяющее динамику изменений температуры подмассива толщиной L :

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{0,5\rho_m c_m h \frac{dT_{0,2}}{dt} + \frac{\lambda_m (T_m - T_c)}{\sqrt{a_m t}} + \frac{\lambda_m (T_{0,2} - T_c)}{h} - q_s}{\rho_m c_m (L + 0,5h)} . \quad (2)$$

Плотность теплового потока на наружной поверхности трубной системы q_0 и ее температура T_0 находятся согласно зависимостям [3]:

$$q_0 = \frac{q_s L}{2\pi R_0}; \quad T_0 = T_c - \frac{q_0 R_0}{\lambda_m}; \quad A_c = \frac{q_0 (0,5L - R_0)}{\lambda_m (T_c - T_0)} . \quad (3)$$

Ниже приводятся результаты конкретных расчетов при полугодовом (15 октября – 15 апреля) извлечении теплоты. Для г. Артемовска имеем [2]:

$$T_c(0) = T_z(0) = 13,2^\circ \text{C}, \quad T_{0,2}(0) = 12^\circ \text{C},$$

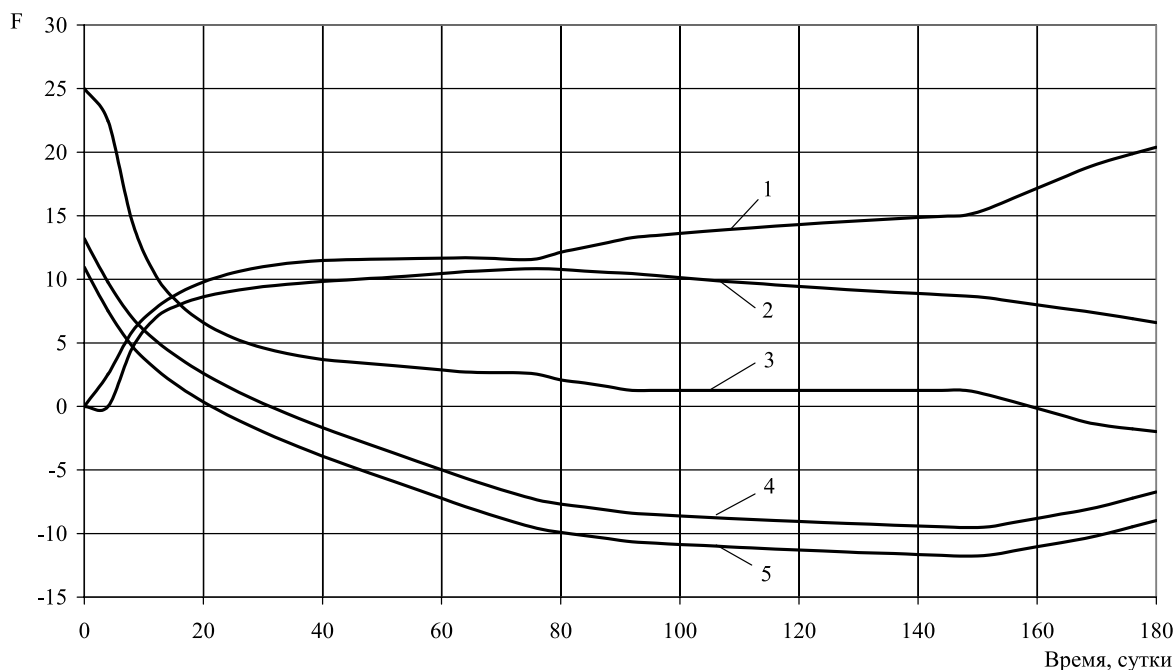


Рис. 3. Изменение параметров извлечения теплоты трубной системой из суглинистого грунта.
 1 – q_{ϕ} , Вт/м², 2 – q_m , Вт/м², 3 – q_z , Вт/м², 4 – T_c , °С, 5 – T_{ϕ} , °С.

$$\frac{dT_{0,2}}{dt} = \begin{cases} -1,85 \cdot 10^{-6} \text{ К/с} & \tau = 0 \dots 75 \text{ сут.} \\ 0 & \tau = 75 \dots 150 \text{ сут.} \\ 2,39 \cdot 10^{-6} \text{ К/с} & \tau = 150 \dots 180 \text{ сут.} \end{cases}$$

Теплофизические свойства породы терриконов существенно отличаются от свойств обычных грунтов. Если для суглинков $\rho_M = 1,84 \cdot 10^3$ кг/м³, $\lambda_M = 1,42$ Вт/(м·К), $c_M = 1,15$ кДж/(кг·К), то из-за повышенной порозности засыпки терриконов и низкой теплопроводности угля приходится ориентироваться на значения [4]: $\rho_M = 1,52 \cdot 10^3$ кг/м³, $\lambda_M = 0,50$ Вт/(м·К), $c_M = 0,83$ кДж/(кг·К). Естественно, что удельный теплосъем не должен превышать указанную вначале естественную теплопоглощающую способность – 10...35 Вт/м². На рисунках 3 и 4 представлены результаты расчетов для суглинистого грунта и для терриконовой породы. Оказалась одинаковой тенденция достаточно медленного изменения основных параметров, что отвечает принятому допущению при составлении (1). В осенний период интенсивно используется теплота нагретого грунта. По мере снижения его температуры возрастает вклад глубинной теплоты и теплоты атмосферы. С наступлением весны увеличивается атмосферный теплопоток и это приводит

даже к росту температуры теплоносителя. В количественном отношении результаты существенно различаются. Для суглинистых грунтов при теплосъеме $q_s = 25$ Вт/м² температура T_0 не опускалась ниже –12 °С, а для терриконовой породы при существенно меньшем $q_s = 15$ Вт/м² она снизилась до –20 °С. Особенно сильное влияние на динамику изменения T_0 и T_c оказывает трехкратное уменьшение теплопроводности терриконовой засыпки.

Экономическую целесообразность предлагаемого решения оценим на примере террикона с эффективным диаметром 200 м, высотой 50 м при угле отсыпки 35°. Поверхность террикона составляет 37770 м² и снимаемая мощность будет $N = 567$ кВт. При плотности трубопроводной сети 1,7 м/м² протяженность труб составит 64200 м. Для поддержания температуры 60 °С на выходе из двух тепловых насосов мощностью по 300 кВт каждый потребуются затраты электроэнергии

$$\langle N_{\text{т.н.}} \rangle \tau = N \int_{\tau} 1,85 \frac{60 - T_0}{60 + 273} dt =$$

$$= 0,42 N \tau = 1,03 \cdot 10^6 \text{ кВт} \cdot \text{час} ,$$

где $\tau = 180$ суток. Основные капитальные затраты определяются стоимостью труб (при $d = 40$ мм, Ц⁽¹⁾ ~ 6 грн/м) и тепловых насосов (при $N = 300$ кВт,

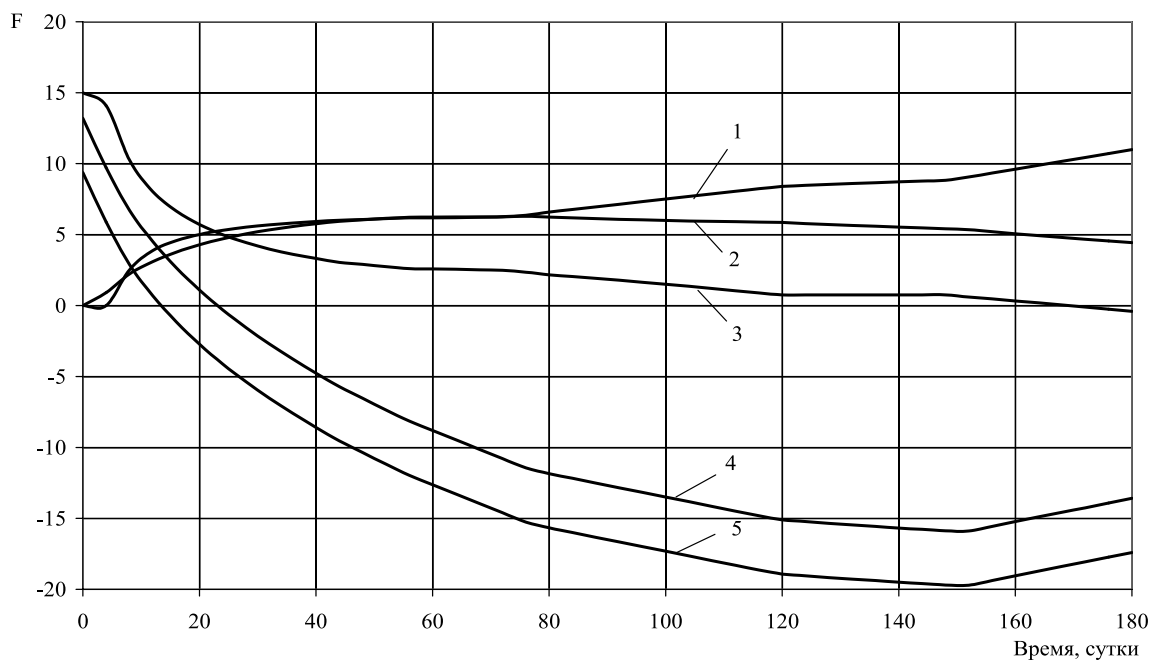


Рис. 4. Изменение параметров извлечения теплоты трубной системой из грунта терриконов.
 1 — q_v , Вт/м², 2 — q_p , Вт/м², 3 — q_g , Вт/м², 4 — T_c , °С, 5 — T_f , °С.

$C_{\text{тн}} \sim 200$ тыс. грн), что составит 785 тыс. грн. При цене электроэнергии, потребляемой тепловыми насосами, 24 коп / (кВт·час), годовые затраты составят 250 тыс. грн. Стоимость произведенной теплоты за год при 250 грн/ Гкал будет 526 тыс. грн. Тогда срок окупаемости составит

$$\Gamma = \frac{785 \cdot 10^3}{276 \cdot 10^3} = 2,84 \text{ года.}$$

Учет техногенной теплоты для объектов с тепловыделением требует конкретного анализа. Естественно, что увеличение извлекаемой энергии приведет к снижению сроков окупаемости. Частота возникновения периодических выбросов породы при ее охлаждении должна уменьшиться. Кроме того, контроль температуры отводимой теплоты по каждому участку сети будет служить диагностикой наступления таких ситуаций. Вследствие разбиения всей трубопроводной сети на участки с возможным их отключением, ущерб от локальных взрывов должен быть небольшим. Стоимость восстановительных работ, учитывая малую стоимость полимерных труб и земляных работ, должна быть небольшой.

Затраты энергии на прокачку теплоносителя по замкнутой трубопроводной системе малы.

При удалении теплопотребителя от террикона происходит дополнительное попутное извлечение грунтовой теплоты вследствие отрицательной температуры теплоносителя.

Учитывая малый срок окупаемости, предлагаемое техническое решение по извлечению восстанавливаемой теплоты из неэксплуатируемых земельных участков представляется перспективным.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Использование терриконов.* / С.В. Дуденков, В.А. Зайцев, Г.Л. Пекелис и др. — Донецк: Донбас, 1983. — 160 с.
2. *Справочник по климату СССР.* Вып. 10, Ч. II. Температура воздуха и почвы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1967. — 608 с.
3. *Накорчевский А.И.* Динамика разрядки теплового аккумулятора в неограниченном грунтовой массе // ИФЖ. — 2005. — Т. 78, №6. — С. 70 — 77.
4. *Колоколов О.В., Хоменко Н.П.* Охрана окружающей среды при подземной разработке месторождений полезных ископаемых. — Донецк: “Вища школа”, 1986. — 351 с.