

Рис. 2. Фрагмент трубопровода из перлитовых полуцилиндров

характеристиками прочности и теплоизоляционных свойств, низким водопоглощением (табл. 3) из недефицитных исходных компонентов. Общая продолжительность технологического цикла изготовления изделий не превышает 4–5 ч, т.е. значительно меньше, чем для подобных материалов, выпускаемых в настоящее время.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

1. Кулешов И.В., Торнер Р.В. Теплоизоляция из вспученных полимеров. М., 1987.
2. Понonenко И.Ф., Шевченко О.Г. Волокна и теплоизоляционные материалы на их основе. Киев, 1985.
3. Горьинов К.Э., Горьинова С.К. Технология теплоизоляционных материалов и изделий. М., 1982.

УДК 621.1.016.4

С.Н.ОСИПОВ

К РАСЧЕТУ ПОДЗЕМНОГО АККУМУЛЯТОРА ТЕПЛОТЫ ДЛЯ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ, ОБЩЕСТВЕННЫХ И ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ

При проектировании подземных аккумуляторов теплоты для отопления различных зданий необходимо знать температуру окружающего породного массива при прогреве сферическим источником тепла и последующем остывании по мере отбора накопленной теплоты. В связи с тем что в этом случае определить температуру пород непосредственным измерением затруднительно, так как для этого пришлось бы бурить специальную скважину, одним из путей решения поставленной задачи является аналитический расчет температурного поля.

При составлении математической модели процесса полагается, что в бесконечном изотропном породном массиве, распространение тепла в котором

происходит по закону Фурье, возникает высокотемпературная область сферической формы. Для этого случая в отличие от [1] принята последовательность процессов нагревания и охлаждения породного массива при постоянной в течение каждого процесса температуре теплоносителя. В таком случае дифференциальное уравнение теплопроводности в сферических координатах (начало координат в центре области) имеет вид

$$\frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} = a_0 \left(\frac{\partial^2 T(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right) \quad (1)$$

для области $r > 0; 0 < r < \infty$ с краевыми условиями

$$\left. \begin{aligned} T(r, \tau) &= T_1 && \text{при } 0 < r < r_0; \\ T(r, 0) &= T_0 && \text{при } r_0 < r < \infty; \\ T(\infty, \tau) &= T_0 && \text{при } 0 \leq \tau \leq \tau_0, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где r – расстояние от рассматриваемой точки до начала координат; r_0 – радиус источника; τ – время; τ_0 – продолжительность прогрева массива; $T(r, \tau)$ – температура массива на сфере радиуса r в момент времени τ ; T_1 – температура источника тепла; T_0 – начальная температура массива; a_0 – коэффициент температуропроводности массива в стадии прогрева.

Решение уравнения (1) с краевыми условиями (2) может быть записано в виде [2]

$$\frac{T(r, \tau) - T_0}{T_1 - T_0} = \frac{r_0}{r} \operatorname{erfc} \frac{r - r_0}{2\sqrt{a_0 \tau}}, \quad (3)$$

где $\operatorname{erfc} = 1 - \operatorname{erf}$; erf – интеграл вероятности.

Источник тепла действует в течение времени τ_0 . В дальнейшем начинается процесс остывания массива, для которого краевые условия имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} T(r, 0) &= \left\{ \begin{aligned} T_1 &\text{ при } 0 < r \leq r_0, \\ T_0 + \frac{r_0}{r} (T_1 - T_0) \operatorname{erfc} \frac{r - r_0}{2\sqrt{a_0 \tau}} &\text{ при } r_0 < r < \infty; \end{aligned} \right. \\ T(0, \tau) &\neq \infty; \quad T(\infty, \tau) = T_0; \\ \frac{\partial T(\infty, \tau)}{\partial r} &= \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial r} = 0 \quad \text{при } 0 \leq \tau < \infty. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

На этой стадии время τ отсчитывается от момента прекращения работы источника τ_0 . В данном случае граничные условия означают, что температура в центре координат не может быть бесконечно большой, и в массиве на бесконечно большом расстоянии от источника тепловой поток отсутствует,

а температура пород постоянна. Последнее уравнение системы (4) вытекает из симметрии процессов нагрева и охлаждения.

Если ввести функцию $U(r, \tau) = r(T(r, \tau) - T_0)$ и подставить ее вместо $T(r, \tau)$ в краевые условия (4), то получим постановку задачи о распределении температуры в полуограниченном стержне с тепловой изоляцией боковой поверхности при нулевой температуре на одном из его концов. Общее решение этой задачи имеет вид [3]

$$U(r, \tau) = \frac{1}{2\sqrt{\pi a_1 \tau}} \int_0^{\infty} U(\xi, 0) \left(\exp \frac{-(r-\xi)^2}{4a_1 \tau} - \exp \frac{-(r+\xi)^2}{4a_1 \tau} \right) d\xi, \quad (5)$$

где a_1 — коэффициент температуропроводности массива в стадии остывания.

Реальные горные породы имеют микropopы и содержат влагу. Фазовые превращения воды, ее фильтрация, конвекция водяных паров совместно с различными тепловыми и химическими процессами могут привести к различию коэффициентов температуропроводности при прогреве и остывании массива.

На основании (4) и (5) для стадии остывания

$$\begin{aligned} \frac{T(r, \tau) - T_0}{T_1 - T_0} &= \frac{1}{2} \left(\operatorname{erf} \frac{r+r_0}{2\sqrt{a_1 \tau}} - \operatorname{erf} \frac{r-r_0}{2\sqrt{a_1 \tau}} \right) - \\ &- \sqrt{\frac{a_1 \tau}{\pi r^2}} \left(\exp \frac{-(r-r_0)^2}{4a_1 \tau} - \exp \frac{-(r+r_0)^2}{4a_1 \tau} \right) + \\ &+ \frac{1}{2\sqrt{\pi a_1 \tau}} \frac{r_0}{r} \int_{r_0}^{\infty} \operatorname{erfc} \frac{\xi-r_0}{2\sqrt{a_0 \tau_0}} \left(\exp \frac{-(r-\xi)^2}{4a_1 \tau} - \right. \\ &\left. - \exp \frac{-(r+\xi)^2}{4a_1 \tau} \right) d\xi \end{aligned} \quad (6)$$

в области $0 \leq \tau < \infty$, $0 \leq r < \infty$.

Легко показать, что (6) удовлетворяет уравнению (1), краевым условиям и является единственным решением рассматриваемой задачи [3].

Для проверки применимости полученного решения в практических задачах был проведен следующий эксперимент. В монолите песчаника минимальным диаметром 1 м из карьера Монаховского карьероуправления (Донецкая обл.) была пробурена скважина глубиной 0,5 м и диаметром 0,2 м. В скважине по центру монолита размещали сферический нагреватель, изготовленный из нихромовой ленты сечением 2x20 мм и длиной 6,5 м. Концы ленты приваривали к стальным тоководам, которые теплоизолировали асбестом. В монолите во взаимно перпендикулярных направлениях были пробурены три

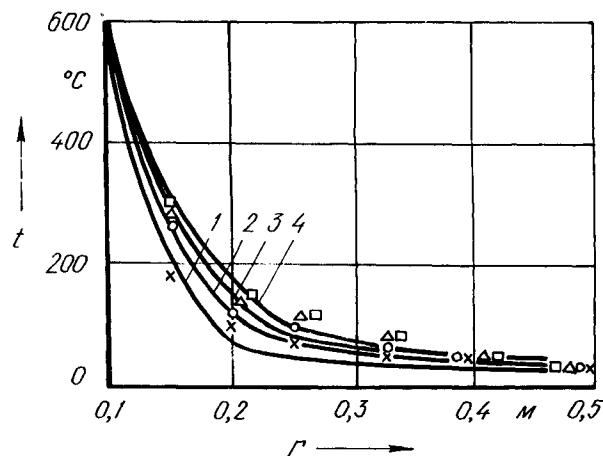


Рис. 1. Распределение температуры в образце при прогреве: 1, 2, 3, 4 — расчетные кривые после прогрева образца соответственно в течение 1, 2, 4 ч; x — экспериментальные данные после прогрева в течение 1 ч; o — то же, 2 ч; Δ — 4 ч

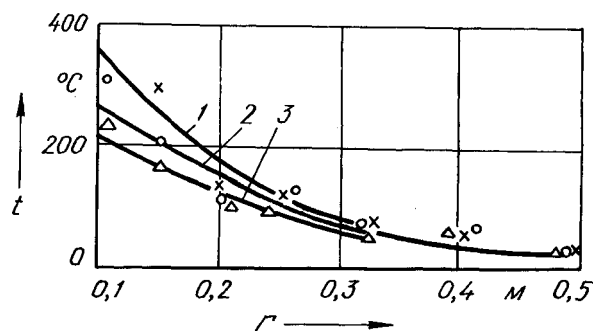


Рис. 2. Распределение температуры в образце при остывании (обозначения те же, что на рис. 1)

Табл. 1. Результаты обработки

Процесс	Расстояние от начала координат							
	0,10		0,15		0,20		0,25	
	σ	ε	σ	ε	σ	ε	σ	ε
Прогрев	—	—	14,6	4,9	18,8	12,5	19,0	22,2
Остывание	59,0	14,8	6,9	2,6	28,3	20,0	5,2	4,3

скважины диаметром 50 мм, в которых располагались пучки хромель-алюмелевых термопар. В каждом пучке было 7 термопар, уложенных так, что спай первой термопары находился у поверхности нагревателя, спай второй — на расстоянии 5 см от нее, третьей — 10, четвертой — 15, пятой — 22,5, шестой — 30, седьмой — 40 см.

Для соблюдения условия бесконечности массива исследования вели до момента заметного изменения температуры на глубине 50 мм от поверхности монолита. С целью контроля температуры в монолите была пробурена скважина глубиной 50 мм, в которой устанавливали ртутный термометр с ценой деления 1 °С. Для достижения надежного контакта монолита с поверхностью нагревателя, термопарами и ртутным термометром скважины и нагреватель плотно заполняли пылью, полученной при бурении монолита. Запись показаний термопар вели с помощью самопишущих потенциометров ЭПП-09М.

Через трансформатор подавали ток на клеммы нагревателя, поверхность которого уже через 30–40 мин имела заданную температуру (600 °С). Общее время прогрева составляло 4 ч. После этого источник тока отключали и в монолите происходило самопроизвольное изменение температурного поля за счет теплопроводности песчаника. Общее время остывания массива — 8 ч.

По формулам (3) и (6) при исходных данных, полностью характеризующих условия эксперимента, значениях коэффициентов теплопроводности $a_0 = a_1 = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{ч}$ рассчитана температура в точках замера (рис. 1, 2).

Для оценки степени совпадения расчетных данных с экспериментальными определяли (табл. 1) среднеквадратическое отклонение σ (°С) и относительную погрешность ϵ (%) для каждой точки и для всего монолита по формулам:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i^a - T_i^p)^2}{n-1}}; \quad \epsilon = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|T_i^a - T_i^p|}{T_i^a}$$

где n — число опытов; T_i^a , T_i^p — значения температуры в эксперименте и по расчету в i -м опыте.

При расчете среднеквадратического отклонения и относительной погрешности первые 45 мин процесса нагрева не учитывали, так как температура поверхности источника не достигала заданного уровня.

Приведенными формулами можно пользоваться при проектировании подземных аккумуляторов теплоты.

экспериментальных данных

рассматриваемой точки, м						Средние значения для образца	
0,325		0,40		0,50			
σ	ε	σ	ε	σ	ε	σ	ε
26,5	41,1	13,8	30,5	0,2	0,5	16,8	18,6
12,3	22,8	14,6	26,8	2,3	7,3	25,5	14,1

1. *Осипов С.Н.* Расчет подземного "котла" при постоянной температуре теплоносителя // Применение гидравлических расчетов при решении инженерных задач. Тула, 1973. Вып. 2. 2. *Паркус Г.* Неустановившиеся температурные напряжения. М., 1963. 3. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. М., 1967.

УДК 658.26

А.П.ЛЕБЕДЕВ, Г.И.БАЗЫЛЕНКО,
В.П.ПИЛЮЩЕНКО

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РАБОТЫ ТЕПЛОБМЕННЫХ АППАРАТОВ В ТЕПЛОВЫХ ПУНКТАХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

В технико-экономических расчетах систем теплоснабжения при различных параметрах теплоносителя не учитываются потери энергии в различных теплообменных аппаратах, которые могут быть весьма существенными. В нашей стране 38–40 % производимой тепловой энергии расходуется на коммунально-бытовые нужды. Уровень же полезного использования ее в системах теплоснабжения зависит от термодинамической эффективности работы теплообменных аппаратов. Для оценки их работы целесообразно применять метод эксергетических балансов. Под эксергией в данном случае понимается то количество теплоты, которое может отдать первичный теплоноситель вторичному в условиях окружающей среды.

Эксергия теплоносителя единичной массы с температурой T

$$e = \frac{T - T_0}{T} q, \quad (1)$$

где $(T - T_0)/T$ — коэффициент, учитывающий энергетический потенциал теплоносителя; T_0 — температура окружающей среды, К; q — теплота, которой обладает первичный теплоноситель, кДж/кг.

Анализ выражения (1) показывает, что греющий теплоноситель при некоторой заданной температуре может отдать только определенное количество теплоты. Всякий теплообмен в силу его необратимости связан со снижением эксергии теплоносителя. Поэтому по уменьшению его эксергии можно судить о термодинамическом совершенстве теплообменного устройства. Исходя из этого, выполнен сравнительный анализ снижения эксергии теплоносителя в элеваторе и теплообменнике при зависимой и независимой схемах присоединения системы отопления при тепловой нагрузке системы отопления $Q = 1,0$ ГДж/ч, расчетной температуре воды в тепловой сети и системе отопления соответственно 150–70 °С и 95–70 °С при $t_{\text{н0}} = -25$ °С. Температура окружающей среды (температура воздуха в тепловом пункте) принята 20 °С.

Снижение эксергии теплоносителя в элеваторе при смешении двух потоков с температурой T_1 и T_2 определяется по формуле

$$\Delta E = E_1 + E_2 - E_{\text{см}},$$

где E_1 , E_2 — эксергия смешивающихся потоков; $E_{\text{см}}$ — эксергия потока после смешения.