

2. Янтовский Е.И., Левин Л.А. Промышленные тепловые насосы. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 128 с.

3. Андреев А.А., Калиниченко И.В. Эколого-энергетические аспекты внедрения на судах теплонасосных паропроизводящих установок// Техногенна безпека: Наукові праці МДГУ ім. П. Могили. Миколаїв: МДГУ, 2006. Т. 61. Вип. 48.

4. Селиверстов В.М. Утилизация тепла в судовых дизельных установках. – Л.: Судостроение, 1973. – 256 с.

5. Радченко Н.И. Использование тепла охлаждающей судовые ДВС воды для производства пара теплонасосными установками// Зб. наук. пр. УДМТУ. – 1999. – № 6 (366). – С. 144-149.

6. Радченко Н.И., Сирота А.А. Теплоутилизирующие контуры на низкокипящих рабочих телах для ДВС// Авіаційно-космічна техніка і технологія: Зб. наук. пр. – Харків: ХАІ, 2002. – Вип. 31: Двигуни та енергоустановки. – С. 17-19.

7. Андреев А.А., Калиниченко И.В. Сравнительная оценка энергетической эффективности судовых паропроизводящих установок различных типов// Зб. наук. пр. НУК. – 2007. – № 2 (413).

8. Оценка эффективности утилизации теплоты судовых главных дизелей теплонасосными паропроизводящими установками/ Ю.В. Захаров, А.А. Андреев, И.В. Калиниченко, В.И. Максимов// Зб. наук. пр. НУК. – 2005. – № 2 (401). – С. 70-79.

Получено 22.01.2007 г.

УДК 536.21+662.997

НАКОРЧЕВСКИЙ А. И.

Институт технической теплофизики НАН Украины

РАЦИОНАЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ В ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЕ “ГРУНТОВОЙ МАССИВ – ТЕПЛОВОЙ НАСОС”

Наведено аналіз роботи одиночного вертикального ґрунтового теплообмінника й сукупності таких теплообмінників. Виявлено негативні наслідки витягання теплоти одним пристроєм та високу ефективність роботи їх сукупності при дотриманні ряду вимог.

Представлен анализ работы одиночного вертикального грунтового теплообменника и совокупности таких теплообменников. Выявлены негативные последствия извлечения теплоты одним устройством и высокая эффективность работы их совокупности при соблюдении ряда требований.

The presented analyze the operation of a single vertical soil heat exchanger and a set of such heat exchangers. We reveal negative consequences of heat extraction by a single device and high efficiency of the work of their sets at the observance of a series of requirements.

A – параметр;

a – коэффициент температуропроводности;

c – удельная теплоемкость;

q – плотность теплового потока;

L – шаг теплообменников;

m – число теплообменников в направлении x ;

N – мощность;

n – число теплообменников в направлении y ;

R – радиус;

r – радиус-координата;

S – площадь поверхности;

T – температура;

t – время;

V – объем;

x, y, z – координаты;

Z – рабочая высота теплообменника;

ρ – плотность;

λ – коэффициент теплопроводности;

Π – периметр.

Индексы:

0 – наружная поверхность теплообменника;

m, n – в направлениях x, y соответственно;

s – поверхность S;
 w – внутренняя поверхность теплообменника;
 к – конечный;
 м – массив;

Проблемы с энергоносителями и ухудшающая экологическая обстановка все настоятельнее заставляют обращаться к нетрадиционным источникам энергии. Одним из них является теплота грунтового массива с потенциалом порядка $T_m = 8$ °С. Для повышения температуры изъятая теплота необходим тепловый насос. Так возникает теплогенерирующая система “грунтовой массив – тепловой насос”. Наиболее рационально эту систему применить для объектов с невысоким термодинамическим потенциалом, а именно в коммунальной сфере – для отопления и горячего водоснабжения жилых зданий. Украине присущ полугодовой отопительный сезон, что заставляет извлекать грунтовую теплоту в холодный период года в течение 180 суток. Почти очевидным инженерным решением представляется использование для этого вертикальных грунтовых теплообменников, размещаемых в буровых скважинах. Проведенные исследования [1-3] показали, что работа одиночного вертикального теплообменника как в случае аккумуляции, так и при извлечении грунтовой теплоты неэффективна. Это объясняется высоким тепловым сопротивлением грунта, что приводит к резкому снижению температуры промежуточного теплоносителя по сравнению с исходной температурой грунтового массива. Так, например, для теплообменника с $R_0 = 0,1$ м к 5,33 часу от начала его работы в суглинке ($\rho_m = 1,84 \cdot 10^3$ кг/м³, $c_m = 1,15 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К), $\lambda_m = 1,42$ Вт/(м·К)) даже при умеренной нагрузке ($q_0 = 50$ Вт/м²) температура теплоносителя T_w понизилась от $T_m(0) = 8$ до 4,5 °С, а радиус теплового действия теплообменника R превысил 2200 м с последующим крутым ростом, что делает невозможным дальнейший численный расчет на современной компьютерной технике. Анализ энергетических соотношений, представленных в [2, 3], при $R \rightarrow \infty$ привел к следующей предельной зависимости изменения температуры на наружной поверхности теплообменника:

н – насос;
 о – основной;
 с – середина;
 т – тепловой.

$$\frac{dT_0}{dt} = -\frac{q_0}{\rho_m c_m} \left[\frac{q_0}{\lambda_m (T_m - T_0)} - \frac{1}{R_0} \right]. \quad (1)$$

Расчеты согласно (1) по методике [4] для “модельного” грунта ($\lambda_m = 1$ Вт/(м·К), $c_m = 1 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К), $\rho_m = 2 \cdot 10^3$ кг/м³, $T_m = 8$ °С), при $R_0 = 0,1$ м и $q_0 = 180$ Вт/м² выявили резкое снижение температуры на наружной поверхности теплообменника с переходом к отрицательным значениям (см. рис. 1), что приводит к промерзанию грунта в окрестности теплообменника и необходимости добавки антифризов в промежуточный теплоноситель. При неравномерной “откачке” теплоты существенно возрастает тепловое сопротивление грунта с прогрессирующим понижением температуры даже при одинаковых среднеинтегральных количествах изъятая теплоты (кривая 3 на рис. 1). Понижение температуры естественно приводит к увеличению энергопотребления тепловым насосом. Таким образом, можно сделать вывод о низкой эффективности работы одиночного теплообменника.

Единственный способ существенного повышения температуры промежуточного теплоносителя в течение всех 180 дней работы – это организация “кустового” расположения грунтовых теплообменников [1-3]. В таком случае создаются основная, неизменная во времени, область извлечения грунтовой теплоты, определяемая контуром “куста” и рабочей высотой теплообменников, и “буферная” подобласть, примыкающая к основной и непосредственно контактирующая с грунтовым массивом (см. рис. 2). Размеры буферной подобласти увеличиваются во времени. Для ее минимизации необходимо осуществить ряд мероприятий. Главное из них – это обеспечение равно нагруженной работы всех элементов основной области, что сравнительно просто осуществимо. В таком случае распределение температур в буферной подобласти и ее размер определяются зависимостями [2, 3]:

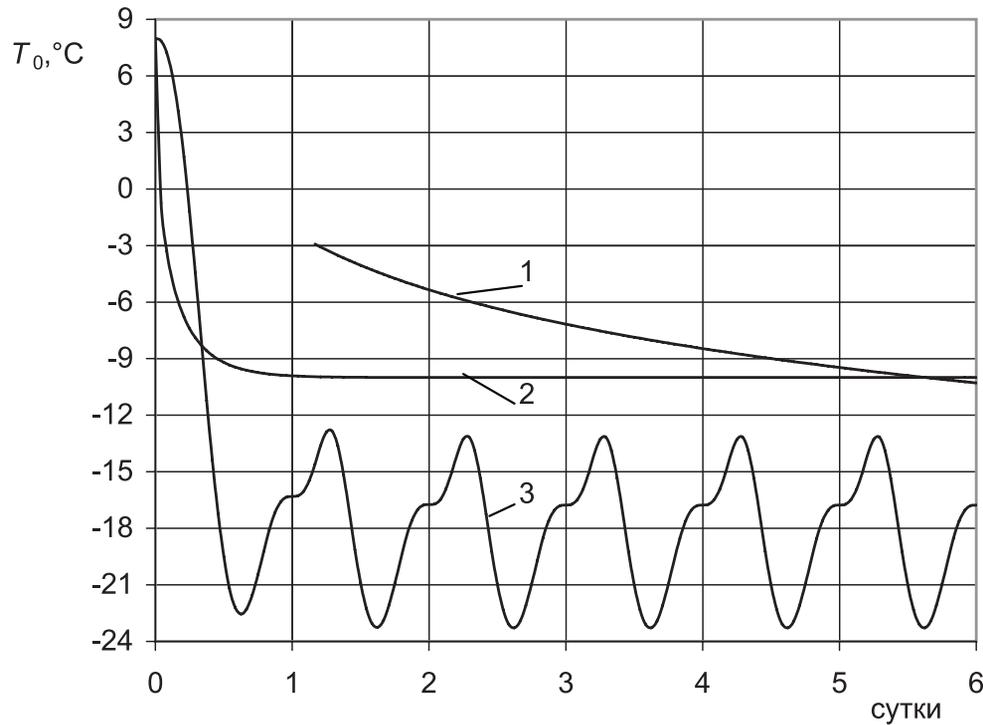


Рис. 1. Температура на наружной поверхности теплообменника.
 1 – по методике [4], 2 – при $q_0 = 180 \text{ Вт/м}^2 = \text{const}$, 3 – при $q_0 = 180 (1 - \cos(2\pi t/86400))$.

$$\frac{T_M - T}{T_M - T_c} = (1 - \psi)^3 (1 + 3\psi), \quad \psi = \frac{u}{R_s}, \quad u = x, y; \quad (2)$$

$$R_s = \sqrt{24a_M t}.$$

Для основной области:

$$\frac{T_c - T}{T_c - T_0} = \begin{cases} (1 - \kappa)^2 (1 + 2\kappa - A_c \kappa) & \text{при } 0 \leq A_c \leq 3, \\ (1 - \kappa)^{A_c} & \text{при } A_c > 3; \end{cases} \quad (3)$$

$$\kappa = \frac{r - R_0}{R_c - R_0}; \quad A_c = \frac{q_0 (R_c - R_0)}{\lambda_m (T_c - T_0)}. \quad (4)$$

Темп снижения температуры в основной области при $q_0 = \text{const}$ будет

$$\frac{dT_x}{dt} = \frac{a_5 + (a_3 + a_4) \frac{dT_0}{dt} - a_2 \frac{dR_s}{dt}}{a_3 + a_4 - a_1}, \quad (5)$$

где

$$\frac{dT_0}{dt} = -\frac{q_0}{\rho_M c_M} \left[\frac{q_0}{\lambda_m (T_c - T_0)} - \frac{R_c}{(R_c - R_0) R_0} \right],$$

$$\frac{dR_s}{dt} = \frac{12a_M}{R_s},$$

$$a_1 = V_0 + 0,4(\Pi_0 Z + 2S_0)R_s + 0,628(Z + 0,5\Pi_0)R_s^2 + 0,479R_s^3,$$

$$a_2 = (T_M - T_c) \left[0,4(\Pi_0 Z + 2S_0) + 1,256(Z + 0,5\Pi_0)R_s + 1,436R_s^2 \right]$$

$$a_3 = 6,28(R_c - R_0)k_p Z \left(\frac{R_c}{A_c + 1} - \frac{R_c - R_0}{A_c + 2} \right),$$

$$a_4 = 6,28(R_c - R_0)k_p A_c \left(\frac{R_c}{(A_c + 1)^2} - \frac{R_c - R_0}{(A_c + 2)^2} \right),$$

$$a_5 = 6,28R_0 Z \frac{k_p q_0}{\rho_M c_M}. \quad (6)$$

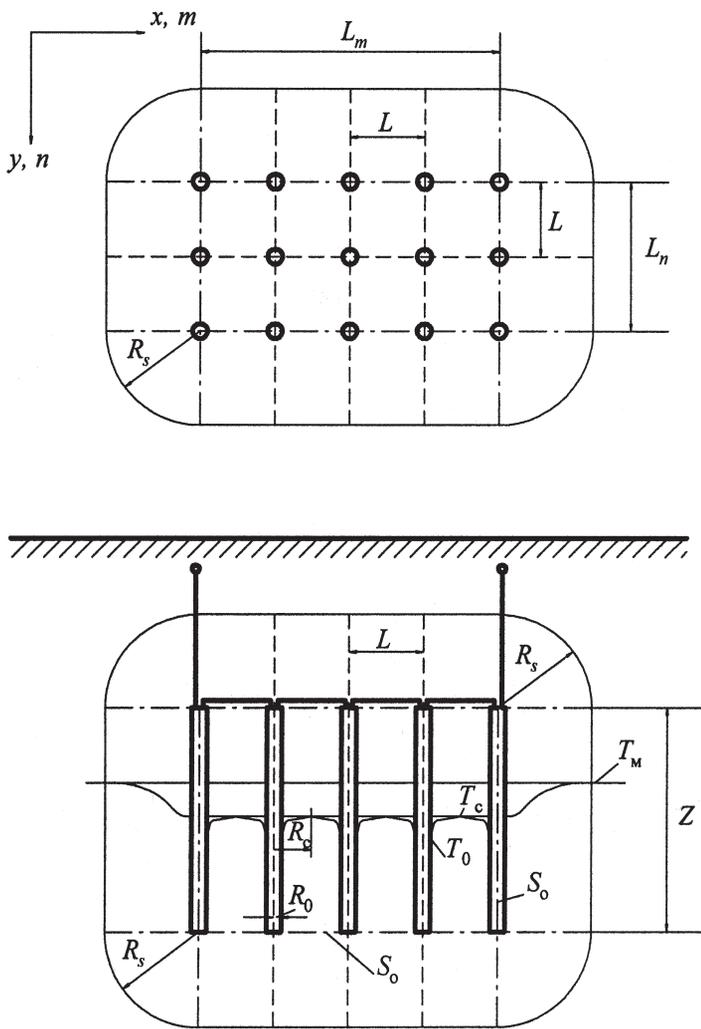


Рис. 2. Расчетная схема извлечения теплоты грунтового массива совокупностью теплообменников.

В свою очередь (см. рис. 2):

$$\begin{aligned}
 R_0 &= L/2, \quad L_m = (m-1)L, \quad L_n = (n-1)L, \\
 \Pi_0 &= 2(L_m + L_n), \quad S_0 = L_m L_n, \quad V_0 = S_0 Z, \\
 k_p &= mn - m - n + 1.
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Система уравнений (2) – (7) замкнута и позволяет рассчитать процесс извлечения теплоты грунта в течение отопительного сезона при заданной извлекаемой тепловой мощности N , исходной температуре грунтового массива T_m и геометрических параметрах R_0 , Z , L , m , n .

Прежде чем представить пример конкретного расчета, необходимо остановиться на концептуальных вопросах извлечения теплоты из грунта. В настоящее время наметилась тенденция по сути неконтролируемого извлечения низкопотенциальной теплоты из разнообразных природных источников – грунта, воздуха, водоемов, а также из источников техногенного происхождения – сточных вод, охлаждающих систем и т. п. Если такие предложения носят единичный характер, то особых возражений они не вызывают. Например, извлечение теплоты для отдельного коттеджа. Другое дело, если это масштабные предложения, к примеру – извлечение теплоты для отопления поселка или города. В последнем случае надо учитывать неизбежное влияние этих мероприятий на климат окружающей местности. Поэтому надо ориентироваться только на полностью возобновляемые источники энергии. Применительно к рассматриваемому вопросу отбор теплоты из грунта в холодную пору года не должен превышать компенсирующего притока теплоты за счет солнечной инсоляции в межсезонье. Значение последней для грунтов Украины находится в пределах $q_M = 10...35 \text{ Вт/м}^2$, что не превышает нескольких процентов от прямого солнечного излучения.

Естественно, что температура промежуточного теплоносителя теплообменников будет близкой к температуре стенки теплообменника T_w , которая, в свою очередь, будет ниже температуры массива T_m . Повышение потенциала теплоты осуществляется тепловым насосом, и расход потребляемой им для этого энергии $N_{т.н}$ определяется зависимостью

$$N_{т.н} = 1,852 \frac{T_k - T_w}{T_k + 273} N, \tag{8}$$

где T_k – конечная температура основного теплоносителя на выходе из насоса. Значение последней должно быть в пределах $35...45 \text{ }^\circ\text{C}$ при внутриспольной системе отопления или $95 \text{ }^\circ\text{C}$ при радиаторной. Возможности ординарных тепловых насосов ограничены $T_k \leq 65 \text{ }^\circ\text{C}$. Числовой коэффициент в (8) отражает к. п. д. теплового насоса, который

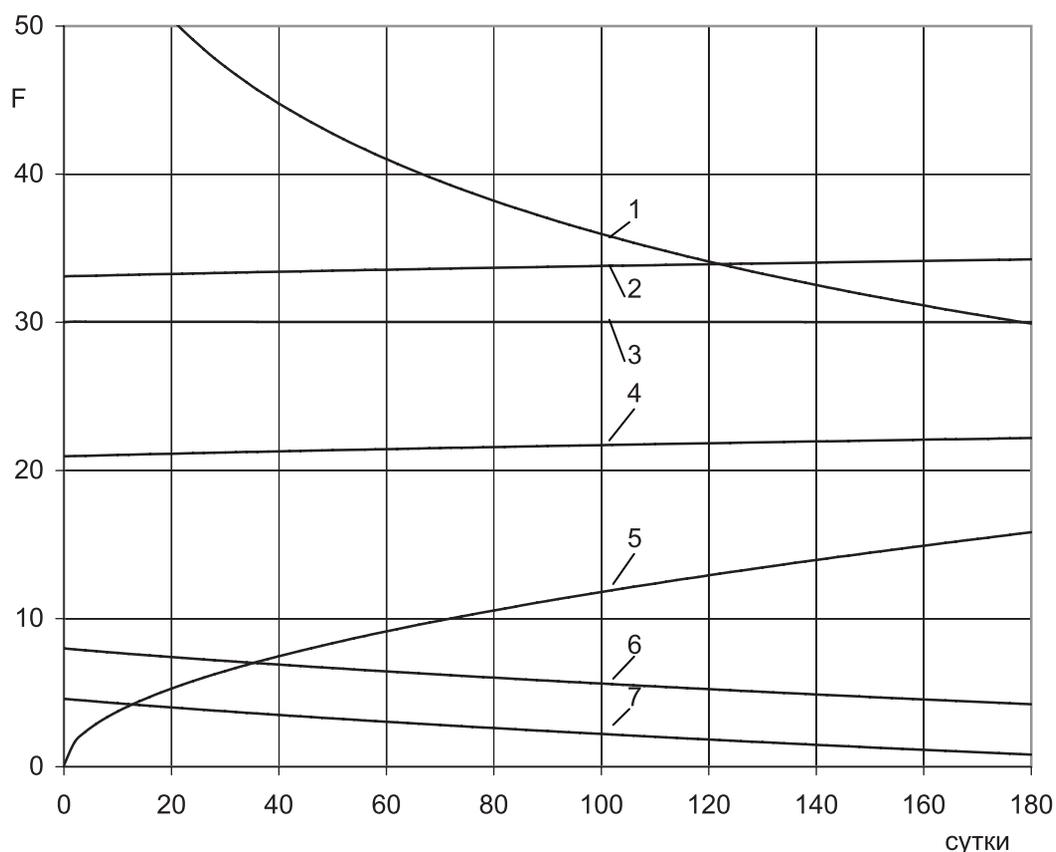


Рис. 3. Динамика изменения параметров процесса в течение отопительного сезона при извлечении теплоты совокупностью вертикальных теплообменников.

1 – q_m , Вт/м²; 2 – η_{65} , %; 3 – A_c ; 4 – η_{40} , %; 5 – R_s , м; 6 – T_c , °C; 7 – T_w , °C.

здесь принят довольно низким (не превосходящим 54 %).

Результаты расчета для суглинистого грунта при следующих исходных условиях:

$R_0 = 0,1$ м, $Z = 80$ м, $L = 6$ м, $m = n = 11$, $q_0 = 50$ Вт/м², $T_m = 8$ °C, $T_{к1} = 40$ °C, $T_{к2} = 65$ °C представлены на рис. 3. Принципиальное отличие от случая одиночного теплообменника состоит в том, что на 180 день непрерывной работы “куста” температура промежуточного теплоносителя T_w не опустилась ниже нуля и температура основной области T_c снизилась всего лишь на 4 °C. При этом, извлеченная мощность составила $N = 250$ кВт. Область теплового действия “куста” увеличилась только на $R_s = 16$ м, тогда как спустя 6 часов от начала работы одиночного теплообменника радиус его действия устремился к бесконечности. Важно подчеркнуть, что к концу отопительного сезона поверхностная плотность извлеченной теплоты

$$q_m = \frac{N}{(L_m + 2R_s)(L_n + 2R_s)} \quad (9)$$

не превысила значения 30 Вт/м², соответствующего реальному компенсирующему действию солнечной радиации в межсезонье. Согласно зависимости (8) количество электроэнергии, потребляемой тепловым насосом, не больше $\eta_{40} = 23$ % от N для поддержания конечной температуры теплоносителя теплосети $T_{к1} = 40$ °C и $\eta_{65} = 35$ % при $T_{к2} = 65$ °C.

Вывод

Представленные исследования однозначно свидетельствуют о предпочтительности “кустового” извлечения грунтовой теплоты по сравнению с разобщенными тепловыми методами.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Накорчевский А.И., Басок Б.И., Беляева Т.Г.* Проблемы грунтового аккумулирования теплоты и методы их решения // Пром. теплотехника. – 2003. – Т. 25, № 3. – С. 42-50.

2. *Накорчевский А.И.* Динамика грунтового аккумулирования теплоты и выбор рациональных решений // Инж.-физ.журнал. – 2004. – Т. 77, №4. – С. 10-19.

3. *Накорчевский А.И.* Динамика разрядки теплового аккумулятора в неограниченном грунтовом массиве // Инж.-физ.журнал. – 2005. – Т. 78, № 6. – С. 70-77.

4. *Карслоу Г., Егер Д.* Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 488с.

Получено 13.04.2007 г.