

УДК 662.995+662.997+536.242+519.673

БАСОК Б.И., АВРАМЕНКО А.А.,
РЫЖКОВ С.С., ЛУНИНА А.А.

Институт технической теплофизики НАН Украины

ДИНАМИКА ТЕПЛООБМЕНА ЖИДКОСТИ В ГРУНТОВОМ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ ОДИНОЧНОМ ТРУБНОМ ЭЛЕМЕНТЕ (ТЕПЛООБМЕННИКЕ)

В статті наведено результати розрахунків одиничного елемента ґрунтового теплообмінника, які виконані за допомогою моделювання теплофізичних процесів у задачах сезонного вилучення теплоти з ґрунтового масиву. Отримано залежності температурних полів від часу вилучення теплоти. Встановлено, що максимальний перепад температури по довжині осі каналу не перевищує 1,8 К. Розподіл температурного поля свідчить про можливість застосування теплообмінників-колекторів для вилучення природної теплоти ґрунту.

В статье приводятся результаты расчетов одного элемента грунтового теплообменника, которые выполнены с помощью моделирования теплофизических процессов в задачах сезонного извлечения теплоты из грунтового массива. Получены зависимости температурных полей от времени закачки теплоты. Установлено, что максимальный перепад температуры по длине оси канала не более 1,8 К. Распределение температурного поля свидетельствует о возможности применения теплообменников-коллекторов для извлечения природной теплоты грунта.

We present the results of calculations of a soil heat exchanger element made by means of modeling of the thermophysical processes in the problems of seasonal heat extraction in a soil massif. The dependence of temperature fields of the time of heat accumulation has been obtained. The maximal temperature drop longwise the channel is less than 1.8 K. The distribution of the temperature field monstates the probability of applying heat-exchangers – collectors for the extraction of specific natural soil heat.

a – коэффициент температуропроводности;
 C – теплоемкость;
 d – диаметр;
 G – расход;
 L – длина;
 p – давление;
 R – эффективный радиус;
 r – радиус;
 T – температура;
 u – скорость по оси Z ;

w – скорость по оси Y ;
 τ – время;
 ρ – плотность;
 λ – коэффициент теплопроводности.
Индексы нижние:
 $г$ – грунт;
 $п$ – пропиленгликоль (теплоноситель).
Сокращения:
ГТО – горизонтальный теплообменник;

В рамках проекта “Создание экспериментальной теплонасосной установки с термальным грунтовым аккумулятором для автономного теплоснабжения” проводится разработка технического проекта отопления, горячего водоснабжения и кондиционирования помещения площадью 54 м² административного корпуса № 1 на территории Института технической теплофизики Национальной академии наук Украины по ул. Булаховского, 2, г. Киев. Одной из основных составляющих данного проекта является горизонтальный теплообменник неглубокого заложения (грунто-

вой коллектор), с помощью которого реализуется процесс извлечения естественной теплоты грунта. После извлечения теплоты грунта на основе теплонасосных технологий осуществляется её использование для теплообеспечения помещений.

Применяемый грунтовой коллектор должен обладать развитой поверхностью теплообмена, а также быть технологичным при монтаже и последующей эксплуатации. Горизонтальные теплообменники (ГТО), в которых в качестве теплоносителя используется раствор полипропиленгликоля, изготавливаются из одиночных прямолинейных

полимерных труб, которые обладают высокой коррозионной стойкостью, и располагаются вблизи зданий на глубине до 2 м. При этом необходимо учитывать, что температура замерзания данной смеси не должна превышать 258 К (во избежание замерзания [1]). Определение площади поверхности грунтового массива для установки теплообменника-коллектора зависит от теплопотребления здания и свойств грунта [1]. Размеры земельной площадки, как правило, ограничены. В целях экономии площади и выбора оптимальной конструкции предложен компактный теплообменник в форме горизонтальной 5-и петельной U-образной конструкции с длиной одиночных труб 24 м. Соседние оси труб располагались на расстоянии 0,95 м.

Задачи грунтового аккумулирования и извлечения характеризуются изменяющимися во времени плотностью теплового потока, температурой теплоносителя, возникновением регулярных разрывов этих функций при прекращении и возобновлении аккумулирования, гидравлической и тепловой инерционностью, обусловленной большой протяженностью тепловых сетей и малой скоростью движения теплоносителя.

Расчет теплопроводности прямолинейного одиночного трубного элемента горизонтального теплообменника (элемент ГТО) осуществляется с помощью моделирования теплофизических процессов в задачах сезонного аккумулирования теплоты в грунтовом массиве.

Результат расчетов позволит исследовать систему ГТО на изменение ее параметров и начальных условий; провести расчеты и сопоставить их с результатами эксперимента в реальных условиях; проанализировать динамику процесса теплообмена в прямолинейном трубном элементе горизонтального коллектора.

При допустимом совпадении результатов эксперимента и расчета возможно применение расчетной методики для более сложной геометрии ГТО.

Целью данной работы является расчет процессов теплопроводности прямолинейного одиночного трубного элемента горизонтального теплообменника с помощью численного моделирования теплофизических процессов в задаче сезонного извлечения теплоты из грунтового массива.

Особенность разработанной модели состоит в возможности определения конечного эффективного радиуса R распространения теплоты в рабочем канале, что необходимо для инженерных расчетов при проектировании (методика и результат расчета соответствуют данным работы [2]).

Исследования проводились с помощью компьютерного моделирования (пакет Fluent 6.3), что дало возможность изучить теплофизические процессы грунтового аккумулирования в натурном масштабе. Для расчета реальных процессов теплообмена в моделях грунтового аккумулирования была использована теплофизическая модель, которая содержала уравнения сплошности, движения и теплообмена, а также краевые условия и условия однозначности. В задачах длительного сезонного аккумулирования и извлечения теплоты из грунтового массива к уравнению теплообмена для искомой функции — температуры, задаются граничные условия четвертого рода, которые сводятся к одновременному заданию равенства температур и тепловых потоков на границе раздела — решается задача о теплообмене двух сред (твердое тело — жидкость, соответственно: грунт — раствор полипропиленгликоля), перенос теплоты описывается уравнениями теплообмена.

Расчет процесса гидродинамики в жидком теплоносителе (раствор воды и полипропиленгликоля) можно осуществить с помощью уравнения неразрывности (1) и уравнения Навье—Стокса (2, 3), которые в цилиндрической системе координат имеют вид [3]:

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0; \quad (1)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial r} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right); \quad (2)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial r} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right). \quad (3)$$

Для учета неизотермических параметров выполнен расчет конвективного теплопереноса с помощью уравнения теплообмена (при теплообмене двух сред (жидкость — твердое тело) для каждой среды перенос теплоты описывается своим уравнением теплообмена):

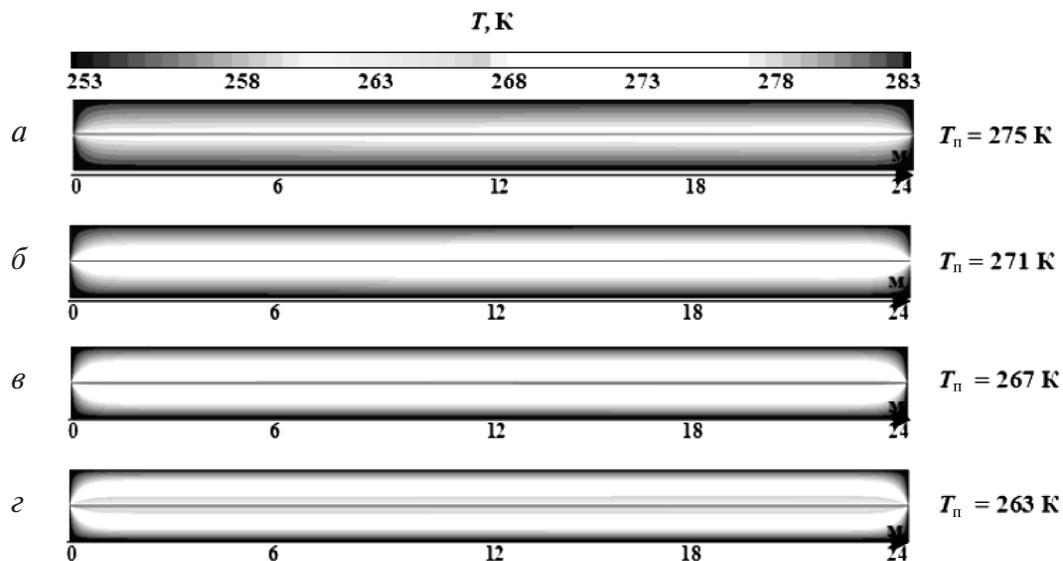


Рис. 1. Температурное поле в расчетной области (сетке) в момент $\tau = 180$ суток при $T_r = 283$ К, $G = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ и различных начальных характеристиках теплоносителя T_n .

— для жидкой фазы (водный раствор полипропиленгликоля):

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial r} + w \frac{\partial T}{\partial z} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

— для твердого тела (стенка трубы, грунт):

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right). \quad (5)$$

В процессе моделирования задавались начальные и граничные условия в соответствии с реальными расчетными зависимостями и параметрами в системах аккумулирования теплоты в грунтовом массиве. В расчетах температура грунта задавалась изначально постоянной и равной: $T_r = 283; 273; 268$ К. В одиночный элемент грунтового коллектора (пластиковая труба с внутренним диаметром $d = 0,028$ м и длиной $L = 24$ м) подавался теплоноситель, температура которого изменялась в диапазоне $T_n = 275 \dots 255$ К с расходом $G = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$. В процессе расчета учитывались теплофизические характеристики грунта (глина с влажным песком: $\lambda = 1,42 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$; $C_r = 1,15 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$; $\rho = 1,84 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$) [4], водного раствора полипропиленгликоля 39%: $\rho = \text{const} = 1048 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 0,379 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$; $C_n = 3730 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$) [5] и пластика трубы [6].

В процессе выполнения работы осуществлялось решение сопряженной задачи в нестационарных условиях.

Так как задача осесимметричная, для расчета выбрана двумерная цилиндрическая полярная система координат. Расчетная сетка канала строилась в соответствии с геометрией рабочего участка экспериментального стенда (грунтового коллектора) с помощью треугольных, а также прямоугольных сегментов и имела такие размеры: длина 24 м, радиус 1 м. Задача охватывала период $\tau = 180$ суток (отопительный сезон).

В результате расчетов получены зависимости температурных полей от времени и начальных теплофизических характеристик грунта и теплоносителя. Формирование температурного поля с эффективным радиусом 1 м определяет зависимость эффективности работы системы от начальных параметров теплоносителя (рис. 1).

Как видно из рис. 1, при перепаде температур $\Delta T = T_r - T_n = 20$ К, эффективный радиус в расчетной области (сетке) достигает значения 1 м, а при $\Delta T = 10$ К — 0,95 м.

На рис. 2 представлен температурный профиль в поперечном сечении трубы канала при $l = L/2 = 12$ м в различные моменты времени при $T_r = 283$ К; $T_n = 273$ К и $G = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$.

Как видно из рис. 2, наблюдается снижение температуры по радиусу канала. Так, в течение суток при расчете динамики теплообмена жидкости в прямолинейном одиночном трубном элементе грунтового теплообменника-коллектора и радиусе

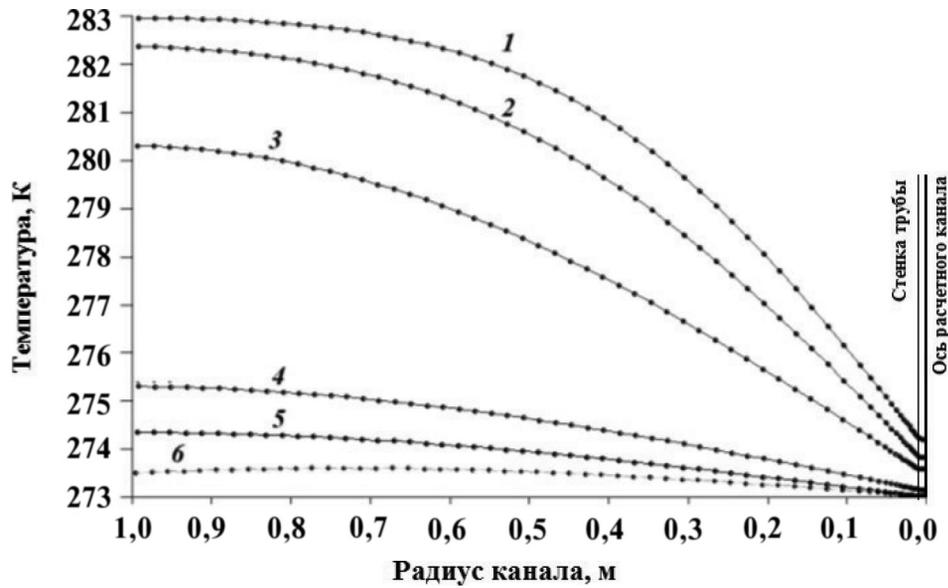


Рис. 2. Моделирование процессов грунтового аккумулярования в осесимметричном канале при $T_r = 283 \text{ K}$; $T_n = 273 \text{ K}$; $G = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$.
Температурный профиль в поперечном сечении трубы за:
1 – 1 сутки; 2 – 3 суток; 3 – 4 суток; 4 – 10 суток; 5 – 20 суток; 6 – 180 суток.

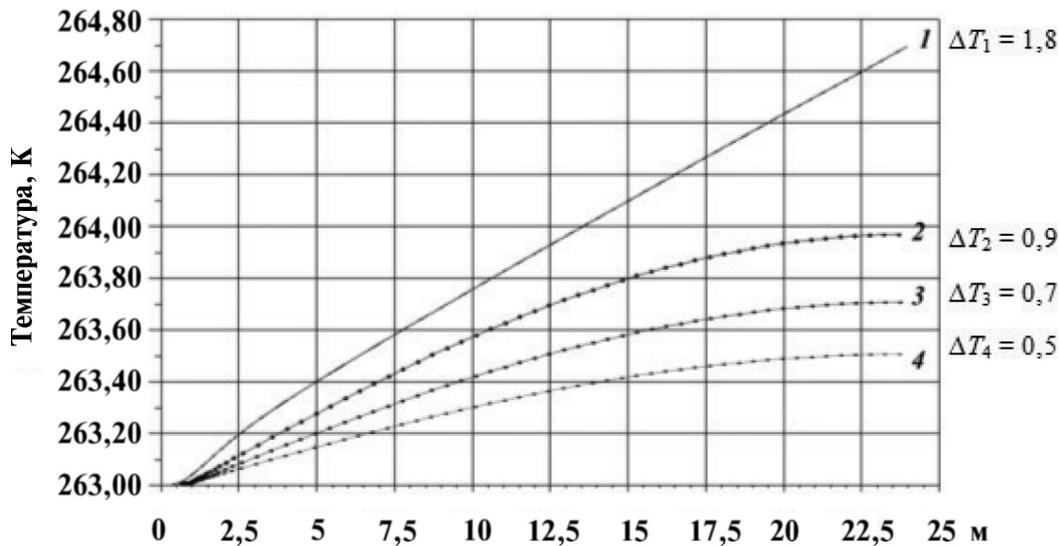


Рис. 3. Графики распределения температурного поля по оси канала.
1 – 1 сутки; 2 – 10 суток; 3 – 20 суток; 4 – 180 суток.

грунтового массива $r=1 \text{ м}$, температура грунта составила $T_r = 283 \text{ K}$, а при $r=0 \text{ м}$ – $T_r = 274,5 \text{ K}$. С увеличением τ происходит падение температуры в грунте. Так, при $\tau = 10$ суток и радиусе грунтового массива 1 м температура грунта составила $T_r = 283 \text{ K}$, а при $r=0 \text{ м}$ – $T_r = 273,5 \text{ K}$.

На рис. 3 представлены графики распределения температурного поля в канале по направляющей

оси при $T_r = 283 \text{ K}$; $T_n = 273 \text{ K}$ и $G = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$. Как видно из графика, максимальный перепад температур в грунте при $\tau = 1$ сутки – $\Delta T_1 = 1,8 \text{ K}$. С увеличением продолжительности работы теплообменника происходит уменьшение перепада температур по оси канала: $\tau = 10$ суток – $\Delta T_2 = 0,9 \text{ K}$; $\tau = 20$ суток – $\Delta T_3 = 0,7 \text{ K}$. Минимальный перепад составил $\Delta T_4 = 0,5 \text{ K}$ (по истечении 180 суток).

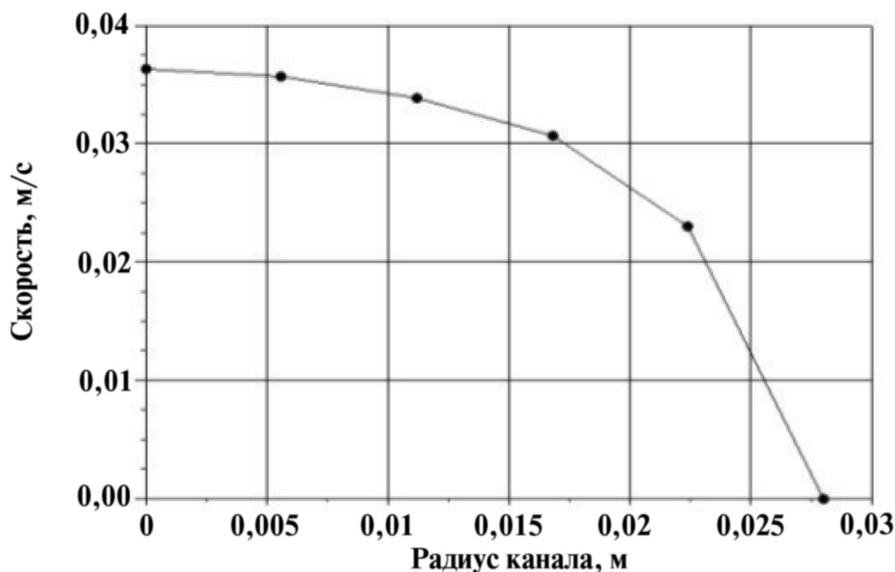


Рис. 4. Профиль скорости в канале при $T_r = 283 \text{ K}$; $T_n = 273 \text{ K}$; $G = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$.

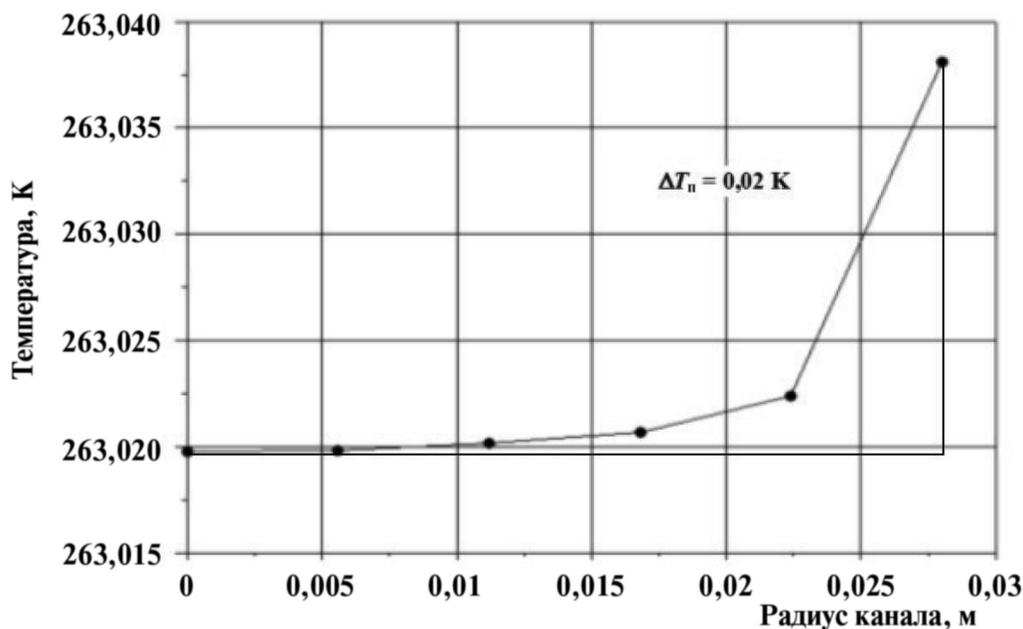


Рис. 5. Профиль распределения температурного поля в канале при длине $l = L/2 = 12 \text{ м}$; $T_r = 283 \text{ K}$; $T_n = 273 \text{ K}$; $G = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$.

Профили скорости и распределения температурного поля в расчетном канале при $T_r = 283 \text{ K}$; $T_n = 273 \text{ K}$; $G = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ представлены на рис. 4, 5. Как видно из рис. 4, скорость у стенки канала равна 0. Течение раствора полипропиленгликоля в рабочем канале имеет ярко выраженный ламинарный характер. Так, максимальное значение скорости $u = 0,037 \text{ м/с}$ ($Re = 508 \dots 931$).

Из графика распределения температурного поля в расчетной трубе видно, что перепад температур между стенкой трубы и центром течения жидкости не превышает $T_n = 0,02 \text{ K}$.

Выводы

В результате расчета тепловых полей в рабочем канале с помощью моделирования теплофизи-

ческих процессов в задачах длительного сезонного аккумулирования теплоты в грунтовом массиве определены зависимости и характеристики единичных элементов системы грунтового аккумулятора. Установлено, что максимальный температурный перепад по длине канала составляет 1,8 К, а распределение температурного поля свидетельствует об эффективности применения теплообменников для отбора теплоты грунта.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Viessmann*. Системы тепловых насосов. Инструкция по проектированию. (5829 122-2 GUS 2/2000).
2. *Накорчевский А.И.* Динамика разрядки теплового аккумулятора в неограниченном грунтовом массиве // ИФЖ. — 2005. — Т.78, №6. — С.70 — 77.
3. *Теплотехнический справочник*. Том 2. Издание 2-е, переработанное. — М: “Энергия”, 1976. — 896 с.
4. *Басок Б.І., Воробійов Л.Й., Михайлик В.А., Луніна А.О.* Теплофізичні властивості природного ґрунту // Пром. теплотехніка. — 2008. — Т. 30, № 4. — С. 77 — 85.
5. <http://www.hladonositeli.ru> — Основные характеристики 15, 33 и 39%-ных водных растворов полипропиленгликоля.
6. *ГОСТ 26996-86*. Полипропилен и сополимеры пропилена.

Получено 14.10.2008 г.

УДК 662.997

НАКОРЧЕВСКИЙ А.И.

Институт технической теплофизики НАН Украины

СИСТЕМА ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ТЕПЛОАВТОНОМНОГО ДОМА

Запропоновано раціональну схему енергетичного забезпечення опалення та гарячого водопостачання багатопверхового житлового будинку, що протягом року використовує енергію, яка сприймається сонячними колекторами, розташованими на цьому домі, та накопичується у ґрунтовому акумуляторі, що міститься під частиною будинку.

Представлена рациональная схема энергетического обеспечения отопления и горячего водоснабжения многоэтажного жилого дома на основе круглогодичного использования энергии, воспринимаемой солнечными коллекторами, расположенными на данном доме, и сезонного грунтового аккумулятора, размещенного под частью здания.

We present a rational scheme of the energy ensuring of heating and hot water supply of a high-rise dwelling house, which, for a year, uses the energy perceived by solar collectors located on this house, and a seasonal soil accumulator, placed under a part of the building.

e — удельная воспринимаемая теплота;
 q — плотность теплового потока;
 N — мощность;
 T — температура;
 t — время;
 S — площадь;
 V — объем;
 β, η — коэффициенты;
 τ — интервал времени;
 Θ — эффективность.

Индексы:
 a — аккумулятор;
 v — вода;
 vz — воздух;
 g — горячий;
 k — конец;
 $мес$ — месяц;
 n — начало;
 $ос$ — основной;
 $от$ — отопление;