

$$\text{grad}\mu_w = \min \quad (24)$$

Это значит, что должны быть предприняты меры по выравниванию химического потенциала влаги в рассматриваемом локальном объеме. Например, установлением оптимальной дисперсности материала или управление градиентами температуры для понижения градиента μ_w (при использовании некоторого комбинированного режима).

Минимальное значение третьего слагаемого в выражении (15) определяется постоянством скорости диффузии или минимальным значением

$$\text{grad}v_w = \min, \quad (25)$$

а также минимумом механических напряжений. Другими словами изменениями объема и формы мате-

риала не должно быть или они должны быть минимальными. Для выполнения этого условия должны быть проведены соответствующие экспериментальные исследования по определению объемных изменений в системе при различных режимных параметрах и для различных начальных условий.

Выводы

Таким образом, анализ баланса энтропии дает возможность задать параметры процесса с максимальной энергоэффективностью на основании установления функциональных зависимостей коэффициентов теплопроводности и диффузии, а также выбрать наиболее эффективный способ подвода энергии.

Литература

1. Погожих, Н. И. Процес сушіння як енергоефективний перехід термодинамічної системи у стан рівноваги [Текст] / Н. И. Погожих, Н. М. Цуркан // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: Зб. наук. праць / Редкол.: О.І. Черевко (відпов. ред.) та ін.; Харк. Держ. Ун-т харчування та торгівлі. – Харків, 2009. – Вип. 1(9). – с. 172-179.
2. Дьямрти, И. Неравновесная термодинамика [Текст] : пер. с англ. – М. В. Коробов; М. : Изд. «МИР», 1974. – 304с.

Проведено оцінку впливу завдання граничних умов при моделюванні ґрунтових теплообмінників горизонтального типу на величину теплозбіру з ґрунтового масиву протягом опалювального періоду
Ключові слова: ґрунтовий теплообмінник, тепловий насос, теплозбір

Проведена оцінка впливу завдання граничних умов при моделюванні ґрунтових теплообмінників горизонтального типу на величину теплозбору з ґрунтового масиву в течение опалювального періоду

Ключевые слова: ґрунтовий теплообмінник, тепловой насос, теплозбор

An assessment of the influence of the boundary conditions for modeling of groundwater heat exchangers of horizontal type on the value of heat collection from ground mass during the heating season is made

Keywords: soil heat exchangers, heat pump, heat collection

УДК 621.577

ОБОСНОВАНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ГРУНТОВЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

А. И. Тарасов

Доктор технических наук, профессор
 Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»
 Кафедра турбиностроения
 ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, 61002
 Контактный тел.: (057) 705-06-05

В. А. Тарасова

Кандидат технических наук, младший научный сотрудник
 Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного
 НАН Украины
 ул. Дм. Пожарского 2/10, г. Харьков, 61046
 Контактный тел.: (0572) 94-27-94, (0572) 94-46-35
 E-mail: VAT1971@mail.ru

Тенденция резкого роста цен на различные виды топлива, которая наблюдается в настоящее время, по всей видимости, будет только усиливаться в будущем. Поэтому актуальным является поиск альтернативных источников энергии и создание устройств ее эффективного получения на основе глубокого анализа теоретических и экспериментальных исследований. Одним из наиболее успешных решений на этом пути являются тепловые насосы (ТН), которые уже сейчас достаточно широко используются для обогрева и кондиционирования воздуха, как в небольших жилых помещениях, так и в торговых центрах, и на промышленных предприятиях. Существуют различные схемы тепловых насосов, отличающихся главным образом источником теплоты и расположением труб теплообменника. В случае использования теплоты грунта возможны схемы с горизонтальными или вертикальным размещением труб. Каждая из этих схем имеет как преимущества, так и недостатки. Учитывая большую стоимость теплонасосной установки, уже на этапе проектирования необходимо обосновать целесообразность применения той или иной схемы, определить потенциальные возможности грунта аккумулировать теплоту и найти оптимальные режимы работы ТН с учетом климатических условий.

В данной работе ограничимся рассмотрением горизонтальных грунтовых теплообменников (ГТ), представляющих собой систему параллельных труб, уложенных на глубине от 1 до 2 м. По трубам движется рассол, который нагревается главным образом, за счет аккумулированной землей теплоты. Температура рассола увеличивается по длине трубы и ее максимальная величина в пределе не может превышать температуру окружающего грунта в конечной точке трубы для рассматриваемого времени года. Таким образом, по длине трубы условия теплообмена изменяются, что делает задачу теплового взаимодействия рассола и грунта трехмерной. Очевидно, что трехмерная задача может быть сведена к серии двумерных задач в вертикальных сечениях грунтового массива, если пренебречь перетеканием теплоты вдоль трубы и задавать температуру рассола в каждом из сечений с учетом его подогрева в предшествующих частях трубы. К сожалению, такой подход не вполне корректен в силу двух причин.

Соединение труб в ГТ может быть как параллельное, так и последовательное. При параллельном соединении в смежных трубах в каждом из рассматриваемых сечений температура рассола одинаковая, что позволяет достаточно корректно учитывать взаимное влияние расположения труб на величину теплового потока от грунта и рассчитывать подогрев рассола последовательно по участкам, переходя вдоль движения теплоносителя от одного сечения грунтового массива к другому. При последовательном соединении температуры в соседних трубах отличаются на величину подогрева рассола на длине участка трубы между рассматриваемыми позициями. Поскольку величина подогрева заранее не известна, то приходится ей задаваться или пренебрегать ее влиянием.

Вторая причина заключается в том, что процесс теплового взаимодействия грунта и рассола нестационарный и величина теплового потока, а, следовательно, и мощности теплообменника зависит от предыстории, т.е. от режима сбора теплоты во времени.

Для простоты анализа остановимся на случае с параллельной укладкой труб. Двумерная математическая модель такого теплообменника в силу симметрии представляет собой массив грунта с половиной периметра трубы (рис. 1). Вертикальный размер массива определяется в зависимости от задания условий на нижней границе. Согласно [1, 2] существует так называемый нейтральный слой, для которого температура на глубине от 10 до 20 м остается неизменной в течение года и равна, как правило, среднегодовой температуре наружного воздуха. Положение нейтрального слоя зависит от теплофизических свойств грунта, чем больше теплопроводность грунта, тем глубже расположен нейтральный слой. Поэтому при задании граничных условий первого рода вертикальный размер массива должен быть более 10 м.

Этот размер может быть значительно уменьшен без снижения точности расчета, если задавать плотность теплового потока q , идущего от ядра земли к поверхности. По данным [1] величина $q=0,1-0,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times \text{К})$. Забегая вперед, отметим, что неопределенность значения теплового потока на нижней границе модели слабо сказывается на величине теплосбора.

Изменение температурного поля грунта находится путем решения краевой задачи теплопроводности

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t, \quad (1)$$

при этом граничными условиями (ГУ) являются условия первого и третьего рода.

В уравнении (1) приняты следующие обозначения: t – температура грунта, °С; τ – время, с; a – теплопроводность грунта, $\text{м}^2/\text{с}$.

На рис. 1 представлена схема массива грунта с полиэтиленовым трубопроводом (внешний диаметр $d=0,040 \text{ м}$), проложенным на глубине $h=1,5 \text{ м}$, в качестве грунтового теплообменника. Внутри рассматриваемого ГТ змеевикового типа, заложенного с шагом между петлями $s=1 \text{ м}$, прокачивался хладоноситель, 30% раствор этилен гликоля, со скоростью $w = 1 \text{ м}/\text{с}$.

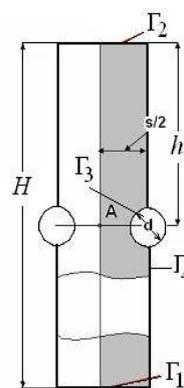


Рис. 1. Схема массива грунта с горизонтальным грунтовым теплообменником

При формировании математической модели был выбран элемент грунта шириной $s/2=0,5 \text{ м}$ и глубиной $H=10 \text{ м}$ (рис. 1). Модель позволяла варьировать этими величинами.

В качестве начальных условий принималось равномерное распределение температуры в элементе грунта

$t_0 = \text{const}$, при этом начальная температура t_0 задавалась равной среднегодовой температуре наружного воздуха.

Были приняты следующие граничные условия:

- на границе Γ_1 задано условие второго рода $q = \text{const}$;
- граничные условия на Γ_2 являлись предметом данного исследования и о них будет сказано позже;
- на границе Γ_3 было задано условие третьего рода

$$\alpha_{\text{тр}}(t - t_s) = -\lambda_{\text{тр}} \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_{n=0}, \quad (2)$$

- где t_s – температура рассола, °С; $\alpha_{\text{тр}}$ – коэффициент теплоотдачи от внутренней стенки трубы к хладоносителю (рассолу) Вт/(м²×К). Для расчета $\alpha_{\text{тр}}$ использовались известные критериальные уравнения для вынужденного течения жидкости в трубах [3];
- на границе $\Gamma_4 - \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{n=0} = 0$.

Для решения уравнения (1) с краевыми условиями использовался метод конечных элементов.

Наибольшую сложность при построении математической модели представило обоснование задания граничных условий теплообмена на поверхности грунта Γ_2 (рис. 1). Известно, что между поверхностью грунта имеет место сложный теплообмен, и направление теплового потока меняется не только в различные времена года, но и в течение суток. По данным [4] на верхней границе атмосфера получает радиацию (инсоляцию), величина которой равна 1390 Вт/(м²×К). При этом значительная часть инсоляции возвращается обратно в космос (42 %) за счет отражения от облаков, пыли и т.д. Из оставшихся 58 % до поверхности земли доходит только 27 % прямого солнечного излучения вследствие поглощения лучистой энергии водяными парами, углекислым газом, озоном, окислами азота и соединениями углерода, пылью и т.д. В течение года эта величина меняется. Одновременно с прогревом почвы лучистым путем идет отдача теплоты теплопроводностью от поверхности почвы к ее нижним слоям и отдача теплоты воздуху за счет эффективного излучения поверхности и конвективной теплоотдачи. Кроме того, происходит потеря теплоты с испаряющейся влагой. В течение суток направление теплового потока меняется, т.е. он может быть направлен к поверхности грунта или от него. В результате температура грунта и температура прилегающих слоев воздуха находятся в тепловом взаимодействии.

Очевидно, что для замыкания модели необходимо пойти на некоторое упрощение условий. В справочных материалах метеослужб имеются обширные данные

о среднемесячных (средних, максимальных и минимальных) температурах воздуха практически для всех населенных пунктов планеты. Это определяет стремление использовать для расчета температуры грунтового массива именно температуру приземных слоев воздуха.

В самом деле, температура воздуха является результатом сложного взаимодействия поверхностных слоев грунта, инсоляции, состояния грунта и в значительной степени зависит также от перемещения воздушных потоков над землей т.д. Таким образом, пренебрегая сложным теплообменом приземных слоев воздуха и земли, можно принять, что температура воздуха является однозначно связанной с изменением температуры грунта. Эта связь особенно очевидна при интенсивном перемещении воздушных масс в периоды смен времен года.

На сегодняшний день в литературе достаточно широко представлены работы, в которых рассматриваются различные подходы к заданию граничных условий на поверхности грунта [5, 6, 7]. Каждый из этих подходов приводит к некоторым погрешностям и поэтому целесообразно оценить их влияние на расчет температуры грунта в целом и, особенно, на глубине заложения труб ГТ.

Для этого были рассмотрены следующие подходы задания граничных условий на поверхности грунта Γ_2 (см. рис. 1):

Предполагалось, что температуры поверхности грунта $t_{\text{п.гр}}$ и воздуха $t_{\text{в}}$ близки по величине, что дает возможность использовать граничные условия первого рода $t_{\text{п.гр}} = t_{\text{в}} = f(\tau)$, значения которых определены по данным метеослужбы за 2009 – 2010 гг. для г. Харькова [8] и содержат изменение температуры в течение полусуток (день-ночь) (рис. 2).

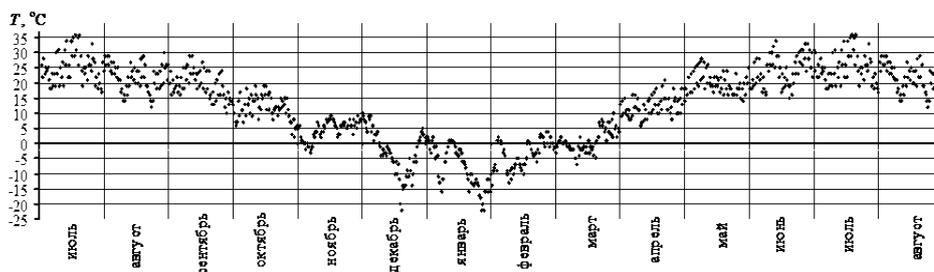


Рис. 2. Изменения температуры наружного воздуха с июля 2009 г по август 2010 г.

Задались граничные условия первого рода $t_{\text{п.гр}} = f(\tau)$. При этом температуры на поверхности грунта могут быть определены по зависимости [6] при $z=0$

$$t(z, \tau) = A e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2a}}z} \cos \left(\sqrt{\frac{\omega}{2a}}z - \omega\tau \right) + t_{\text{ср}}, \quad (3)$$

где $t(z, \tau)$ – температура грунта на глубине z , °С; z – координатная ось, направленная в глубину грунта от его поверхности, м; A – амплитуда колебаний температуры поверхности грунта, °С; ω – период колебаний температуры; $t_{\text{ср}}$ – среднегодовая температура воздуха °С.

Амплитуда колебаний температуры поверхности грунта $A=17$ °С и среднегодовая температура воздуха

$t_{cp}=10,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ определены по данным [8] для периода с июля 2009 г по август 2010 г.

3. Задавались граничные условия третьего рода

$$\alpha(t - t_a) = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_{n=0}, \quad (4)$$

при этом температура воздуха t_a задавалась согласно [8], см. рис. 2.

В силу непредсказуемости погодных условий и других очевидных причин коэффициент теплоотдачи от грунта к воздуху не может быть вычислен точно. Однако его величина при естественной конвекции достаточно низкая и не превышает $23\text{ Вт}/(\text{м}^2 \times \text{К})$ [1]. Такая величина коэффициента теплоотдачи рекомендуется для использования теплопотерь ограждающих конструкций [9].

Следует отметить, что задача решалась для «непотревоженного» состояния грунта.

На рис. 3 показано сравнение колебаний температуры грунта в течение года на разной глубине, полученных в результате расчетов при граничных условиях, заданных с использованием указанных подходов.

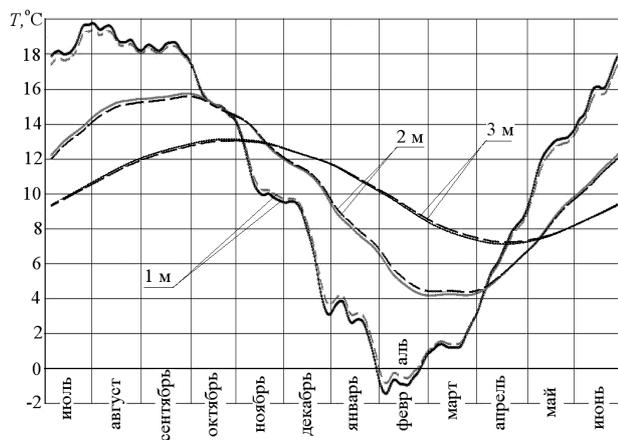


Рис. 3. Изменения температуры грунта на глубине 1, 2, 3 м: сплошная линия соответствует первому подходу задания граничных условий на поверхности; штрихпунктирная – третьему подходу.

На глубине 1 м разность температур составляет $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, а на глубине 3 м – кривые практически совпадают. Это можно объяснить тем, что влияние изменения температуры воздуха проявляется до глубины нейтрального слоя ($H=10\text{ м}$). В соответствии с теорией теплопроводности при критерии Био $Bi = \frac{\alpha H}{\lambda} = \frac{23 \cdot 10}{1,5} = 153$ [3] на Γ_2 корректно задавать гра-

ничные условия первого рода, т.е. равенство температуры грунта на поверхности и температуры наружного воздуха.

На рис. 4 приведены результаты расчетов, полученных при решении нестационарной задачи теплопроводности с граничными условиями на поверхности грунта, заданными 1-м и 2-м подходами.

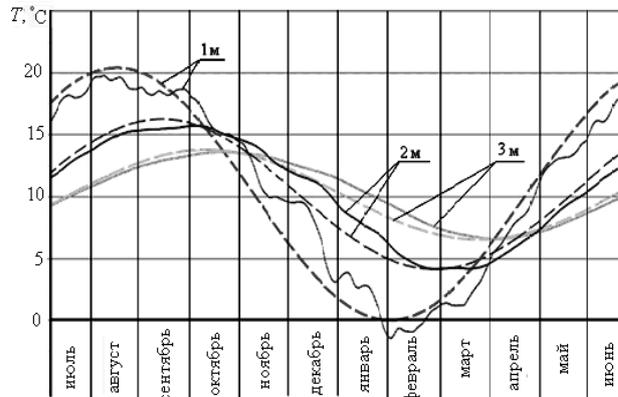


Рис. 4. Изменения температуры грунта на глубине 1, 2, 3 м: сплошная линия соответствует первому подходу задания граничных условий на поверхности; штрихпунктирная – второму подходу.

Отличия в значениях температуры грунта около $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ проявляются на глубине до 1 м в декабре месяце. На глубине 3 м максимальная разность между температурами составляет примерно $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ в декабре и январе.

Для более полного исследования были получены колебания температуры грунта на разных глубинах в течение октября 2009 г. При этом задавались ГУ первого рода $t = t_v = f(\tau)$, учитывающие колебания температуры в течение суток. Из рис. 5 видно, что суточные (день – ночь) изменения температуры проявляются на глубинах до 50 см, глубже – колебания температуры сглаживаются.

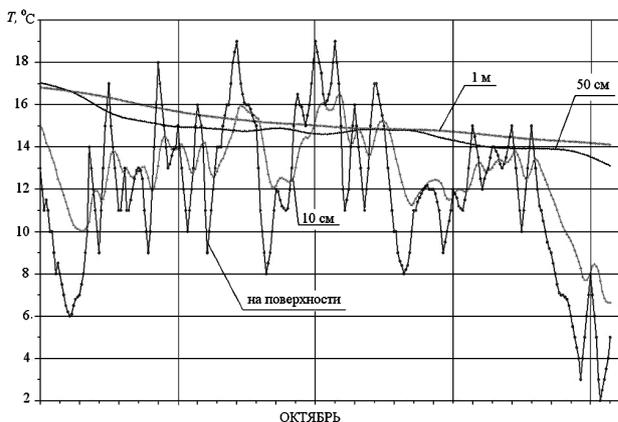


Рис. 5. Изменения температуры грунта в течение октября месяца при задании ГУ первого рода на поверхности грунта согласно [9]

Несмотря на то, что разность температур, полученных при задании ГУ разными способами, мала, и суточные колебания уже не проявляются на глубинах свыше 50 см, этого недостаточно для того, чтобы утверждать о корректности задания ГУ тем или иным способом. Окончательно оценить влияние ГУ можно только по величине теплосбора с грунта грунтовым теплообменником (см. рис.1). Было принято, что температура рассола на входе в ГТ $t_s^{bx} = -1\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение отопительного периода (октябрь 2009 г – март 2010 г). Для расчета коэффициента теплоотдачи от внутрен-

ней поверхности ГТ к рассолу использовались известные критериальные уравнения для вынужденного течения жидкости в трубах [3].

Для определения теплосбора грунтовым теплообменником путем решения нестационарной задачи теплопроводности в двумерной постановке с заданными граничными условиями находились осредненные значения температур стенки $t_{ст}^p$ по внутренней поверхности трубы (Γ_3) в течение отопительного периода. Значения $t_{ст}^p$ также усреднялись и по каждому месяцу.

Теплосбор с грунта определялся для элементарного участка трубы грунтового теплообменника длиной L

$$Q = \alpha_{ГТ} (t_{ст}^{cp} - t_s^{cp}) \pi d_{вн} L, \quad (5)$$

где t_s^{cp} – средняя температура рассола на участке

трубы грунтового теплообменника. В первом приближении она принималась равной температуре рассола на входе в трубу $t_s^{вх}$, °С; $d_{вн}$ – внутренний диаметр трубы, м.

Далее из уравнения теплового баланса определялась температура $t_s^{вых}$ на выходе из участка длиной L для каждого месяца

$$t_s^{вых} = t_s^{вх} + \frac{4Q}{\rho w \pi d_{вн}^2 c_p},$$

и находилось значение t_s^p . Значение теплосбора на участке длиной L уточнялось по (5).

Данные по теплосбору с грунта трубой ГТ длиной $L=1$ м, заложенной на глубине 1,5 м, представлены на рис. 6.

Следует еще раз отметить, что целью данного исследования была оценка влияния ГУ теплообмена на величину теплосбора с грунта ГТ. Поэтому для простоты задавалась постоянная температура рассола в течение всего отопительного периода, что в результате дало резкое понижение величины теплосбора с января по март. При работе ТН температура рассола не постоянна, она зависит от многих факторов. Следовательно, величина теплосбора в реальных условиях повысится при понижении температуры рассола.

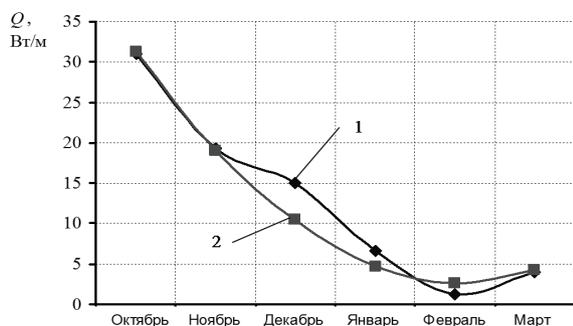


Рис. 6. Теплосбор с грунта ГТ в течение отопительного периода: 1 – при задании ГУ первым подходом [8]; 2 – при задании ГУ вторым подходом по формуле (3) [6]

Несмотря на то, что согласно данным метеослужб самые низкие температуры наружного воздуха наблюдались в декабре и феврале месяце, теплосбор с грунта, вследствие смещения по времени на глубине 1,5 м и истощения грунта работой ГТ, уменьшается к январю и достигает минимального значения в середине февраля.

Выводы

Несмотря на чрезвычайно сложный характер теплообмена поверхности грунта и приземных слоев воздуха, при анализе теплового состояния грунта температура воздуха может быть использована в качестве граничных условий первого рода на поверхности грунта.

Использование граничных условий третьего рода на поверхности грунта не оправдано в связи с неоднозначностью определения коэффициента теплоотдачи и небольшими отличиями температуры воздуха от температуры поверхности грунта. Последнее обусловлено тем обстоятельством, что значение критерия Био на поверхности грунта может достигать величин более 100, что в соответствии с теорией теплопроводности сводит граничные условия третьего рода к граничным условиям первого рода.

Для расчета тепловой мощности грунтового теплообменника при проектировании теплонасосной установки целесообразно задавать температуру поверхности грунта в соответствии с зависимостью (3), которая достаточно надежно усредняет месячные и суточные колебания температуры на поверхности грунта.

Суточные колебания температуры проявляются на глубине до 50 см. Поэтому они могут не учитываться при анализе теплосъема ГТ, который располагается обычно на глубинах от 1 до 2 м.

Для прогнозирования возможности сбора теплоты ГТ в работающей теплонасосной установке в ближайшие 20 - 30 суток целесообразно выполнять расчет теплового состояния грунтового массива с учетом реального изменения температуры воздуха, по крайней мере, в предшествующие 30 суток.

Литература

1. Васильев Г. П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной энергии поверхностных слоев Земли/ Г.П. Васильев. – М.: Издательский дом «Граница», 2003. – 176 с.
2. Чудновский А. Ф. Теплофизика почв/ А. Ф. Чудновский. – М.: Издательство «Наука», 1976.– 355 с.
3. Исаченко В.П., Теплопередача/ В. П. Исаченко В. А. Осипова, А. С. Сукомел. –М.: Энергия, 1975.- 488 с.
4. Гейгер Р. Климат приземного слоя воздуха: Пер.с англ / Рудольф Гейгер. - М. : Изд-во иностр.лит., 1960. – 486 с.
5. Денисова А. Е. Использование энергии грунта в теплонасосных геосистемах энергоснабжения / А. Е. Денисова, А. С. Мазуренко, Ю. К. Тодорцев, В. А. Дубковский // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2000. – № 1. – С. 27 – 30.

6. Тихонов А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский – М.: Наука, 1966. – 620 С.
7. Wenju H.U. Modeling of the bridge deck's hydronic snow-melting system based on ground source heat pump/ H.U. Wenju, Yang YAO, M.A. Zuiliang // International Congress of Refrigeration 2007, Beijing – ICR07-E2-249.
8. Формат доступа: <http://diary.gismeteo.ru>
9. ДБН В.2.6-31:2006 Конструкції будівель і споруд. Теплова ізоляція будівель/ Мінбуд України, Київ, 2006.

Отримано рішення ряду задач для багатошарової нагрівальної системи без урахування її з урахуванням термічних контактних опорів. Наведено аналіз впливу контактних опорів на теплові режими нагрівальних систем

Ключові слова: термічний контактний опір, теплопровідність шаруватої структури

Получены решения ряда задач теплопередачи для многослойной нагревательной системы без учета и с учетом термических контактных сопротивлений. Приведен анализ влияния контактных сопротивлений на тепловые режимы нагревательных систем

Ключевые слова: термическое контактное сопротивление, теплопроводность слоистой структуры

Solutions of some problems for multilevel heating system are received without taking into account and with taking into account the thermal contact resistance. The analysis of influence of contact resistance on thermal modes of heating systems is resulted

Key words: thermal contact resistance, heat transfer of multilayered structure

УДК 519.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКИХ КОНТАКТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ НА ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

А.П. Слесаренко

Лауреат государственной премии Украины, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник
Отдел моделирования и идентификации тепловых процессов
Институт ИПМаш НАН Украины им. А.Н. Подгорного
ул. Пожарского, 2/10, г. Харьков, 61046
Контактный тел.: (0572) 349-47-51, 096-386-30-22

А.С. Сорока

Доцент, кандидат физико-математических наук
Кафедра микроэлектроники, электронных приборов и устройств
Факультет Электронной техники
Харьковский национальный университет радиоэлектроники
им. М.К. Янгеля
пр. Ленина, 14, г. Харьков, 61166
Контактный тел.: (0572) 336-82-24, 096-233-38-15

1. Постановка проблемы

На тепловой режим контактирующих тел значительное влияние оказывает термическое сопротивление, возникающее в области контакта и обусловленное несовершенством механического соединения контактирующих поверхностей [1]. Наличие термических контактных сопротивлений во многих случаях может существенно изменять картину температурных распределений в нагревательной системе даже при незначительном нагреве. Учитывая важность задач проектирования энергоэффективных конструкций и сооружений, актуальной проблемой является разработка методов компьютерного моделирования процессов теплопередачи с учетом неидеального теплового контакта.

С целью исследования влияния термически неидеальных контактов на тепловые режимы нагревательных систем построена математическая модель нагревательной системы (НС) в виде плоскостроистой энергоактивной структуры, применяемой для обеспечения микроклимата сельскохозяйственных производственных сооружений [2-4]. Конструкция такой НС составлена из плоских слоев различных строительных материалов, некоторые слои (активные) содержат тепловыделяющие трубчатые элементы. Конструктивные и технологические соображения позволяют предложить различные варианты выполнения НС, поэтому теплофизическую модель целесообразно построить в самом общем виде с учетом ряда несущественных упрощающих предположений.