

УДК 697.1

Долинский А.А.¹. Драганов Б.Х.².¹Институт технической теплофизики НАН Украины²Национальный аграрный университет

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ ЗДАНИЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Аналізуються принципи спорудження енергоекономічного будинку при використанні нетрадиційних джерел енергії. Енергоефективність рішень рекомендується базувати на методі термоекономічної оптимізації.

Анализируются принципы сооружения энергоэкономического здания при использовании нетрадиционных источников энергии. Энергоэффективность решения рекомендуется основывать на методе термоэкономической оптимизации.

We analyze the principles of building of an energy-economical house with using the nontraditional energy sources. We recommend to base the energy efficient of decisions is on the method of thermoeconomical optimization.

Γ – контур источника (стока);
 c – удельная теплоемкость;
 D – месячная сумма солнечной радиации;
 E – интенсивность солнечной радиации;
 f – коэффициент пересчета солнечной радиации;
 F – площадь поверхности;
 G – расход теплоносителя;
 H – мощность зоны фильтрации;
 m – пористость;
 n – количество скважин;
 P – коэффициент положения поверхности;
 $Q_{сут}$ – суточное поступление теплоты;
 r – коэффициент отражения радиации;
 S – сумма за месяц прямой радиации;
 t, T – температура;

β – коэффициент теплопропускания;
 g – коэффициент восприятия солнечной радиации;
 λ – коэффициент теплопроводности;
 ε_{mn} – эффективность теплового насоса;
 ρ – плотность;
 η – коэффициент полезного действия;
 τ – время.

Индексы:

vx – на входе;
 $ГК$ – гелиоколлектора;
 d – рассеянный;
 k – коллектора;
 o – начальное значение;
 sz – солнцезащитный.

Около 90% действующего жилого фонда не соответствует требованиям теплоэффективности, применяемым в нашей стране (СНиП II-3-79** “Строительная теплотехника” с изменениями и дополнениями от 01.07.1986 и 01.10.1996 гг.). Удельное энергопотребление сооружений в Украине в 2...2,5 раза больше, чем в европейских странах, расположенных в аналогичных климатических условиях. В связи с этим проблема повышения энергоэффективности коммунально-бытовых сооружений является актуальной.

Действенный путь к экономии топливно-энергетических ресурсов заключается в исполь-

зовании нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. В Украине потенциал солнечной энергии значителен. Наибольший результат можно получить, если при проектировании предусмотреть применение всех видов использования солнечного излучения: пассивного, активного и фотоэлектрических преобразователей (рис. 1).

Пассивная (солнечный дом Ф. Тромба и Дж. Мишеля) и активная (солнечные коллекторы) системы направлены на отопление и горячее водоснабжение здания.

Назначение фотоэлектрических преобразователей – поддержание комфортного микроклима-

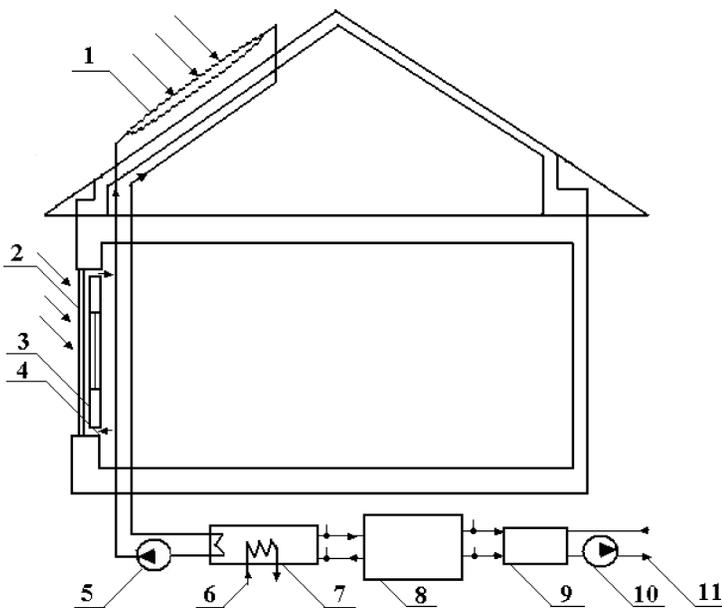


Рис. 1. Схема комплексной альтернативной системы теплоснабжения здания:

- 1 – солнечные и фотоэлектрические элементы;
 2 – одно- или двухрядное остекление;
 3 – теплоаккумулирующие ограждения;
 4 – вентиляционные каналы; 5, 10 – насос;
 6 – источник низкопотенциальной теплоты;
 7 – низкотемпературный аккумулятор;
 8 – тепловой насос; 9 – высокотемпературный аккумулятор; 11 – подача теплоты в систему теплоснабжения.

та (скорость движения воздуха, относительная влажность, сочетание указанных параметров с температурой) в помещении.

Одна из причин, ограничивающих использование нетрадиционных источников энергии, в том числе солнечной, заключается в нестабильности их работы. Средством устранения указанного недостатка служит использование систем аккумулирования энергии за счет накопления пиковой и низкопотенциальной энергии, которые не могут быть непосредственно переданы потребителю.

В системах гелиотеплоснабжения используют тепловые аккумуляторы с твердым аккумулирующим материалом, как правило, с пористой матрицей, и жидкостные аккумуляторы. В качестве сезонных аккумуляторов рекомендуется использовать грунт. Аккумулятор, размещенный в грун-

те, может служить источником низкопотенциальной теплоты (рис. 1). Для повышения температурного потенциала теплоносителя в схеме предусмотрен тепловой насос.

Грунтовый теплообменник чаще всего имеет коаксиальную или U-образную форму. При этом рекомендуется использовать теплообменники вертикального типа, так как для их размещения требуется меньше площади поверхности грунта. Теплообменники размещают либо в ряд [1], либо по схеме “куст” [2].

Наилучшими показателями характеризуются грунтовые теплообменники типа “трубки Фильда”. Конфигурация теплообменника определяется двумя concentричными трубами “одна в другой”. Рабочее тело поступает вниз по внутренней трубке – центральной, а вверх движется по межтрубному каналу.

Структурные схемы гелиосистем теплоснабжения здания с эффективным использованием альтернативных источников энергии анализируются в [3...7]. Однако в схеме, приведенной на рис. 1, предусмотрено большее количество возможных сочетаний источников теплоты, что дает возможность определить оптимальный вариант теплоснабжения методом оптимизации.

Методы оптимизации основываются на математическом моделировании исследуемых явлений.

При расчете и проектировании солнечных коллекторов пользуются методами, изложенными в [8, 9]. Наибольшее внимания заслуживает недавно опубликованная работа по тепловому расчету гелиосистем [10]. В соответствии с этой методикой суточное поступление теплоты от одного квадратного метра гелиоколлектора равно (сохраняя авторские обозначения):

$$Q_{сут} = G_{ТН} c_{ТН} (1 - e^{-N_{ГКр}}) \Psi_c \int_{\tau_1}^{\tau_2} \left(\vartheta_m \sin \pi \frac{\tau}{\tau_c} - \vartheta_{ex} \right) d\tau. \quad (1)$$

Равновесная температура теплоносителя на выходе из гелиоколлектора равна

$$\vartheta_{рТН} = \frac{\gamma_{ГК}}{K_{ГК}} k E_m \cos \mu \left[\sin a (\tau - \tau_\phi) + \sin \mu e^{-b\tau} \right]. \quad (2)$$

Равновесная избыточная температура изменяется по синусоидальному закону

$$\vartheta_p = \vartheta_m \sin \pi \frac{\tau}{\tau_c}, \quad (3)$$

где ϑ_m – максимальное значение избыточной равновесной температуры

$$\vartheta_m = \frac{\gamma_{ГК}}{K_{ГК}} k E_m. \quad (4)$$

В формулах (1)-(4) приняты обозначения: $G_{ТН}$ – расход теплоносителя; $c_{ТН}$ – теплоемкость теплоносителя; $N_{ГКр} = \frac{K_{ГТ} F_{ГТ}}{G_{ТН} c_{ТН}}$; $K_{ГТ}$ – характеристика конструкции, заданная условиями однозначности; $F_{ГТ}$ – площадь тепловоспринимающей поверхности элемента коллектора; ψ_c – коэффициент солнечного сияния; τ – время; τ_c – продолжительность светового дня; ϑ_{ex} – экспоненциально изменяющаяся избыточная температура перед коллектором; $\gamma_{ГК}$ – коэффициент, определяющий степень восприятия солнечной радиации тепловоспринимающей поверхностью; k – коэффициент перерасчета суммарной среднесуточной солнечной радиации, приходящейся на горизонтальную поверхность наклонной поверхности коллектора; $a = \pi/\tau_c$; $b = K_{ГК} F_{ГК} / \sum mc$; $\sum mc$ – общая теплоемкость всех элементов гелиоколлектора; $\mu = \arctg a/b$; E_m – поток максимальной (в полдень) солнечной радиации.

Авторами приводятся примеры расчета и проектирования солнечных систем отопления и теплоснабжения [11].

Теплоснабжение здания с пассивной системой отопления (ПСО) целесообразно размещать в районах со значительным количеством солнечных дней. Перед тепловоспринимающей стеной (“стены Тромба”) устанавливают одно-, двух- или трехслойное отопление.

Теплота солнечной радиации, поступающая через остекление и поглощаемая единицей наружной поверхности стены теплоприемника на протяжении каждого расчетного месяца периода отопления, равна [12]:

$$q_{пол} = K_{пер} K_{заг} \beta_{сз} [(\tau\alpha)_s P_s f_s K_{инс} S + (\tau\alpha)_d P_d f_d K_{обл} D + r(\tau\alpha)_r P_r f_r (S + D)]. \quad (5)$$

В этом уравнении: S, D – сумма за месяц соответственно прямой и рассеянной солнечной радиации, падающей на горизонтальную поверхность; $(\tau\alpha)_s, (\tau\alpha)_d, (\tau\alpha)_r$ – приведенная поглотительная способность соответственно для прямой, рассеянной и отраженной радиации; P_s, P_d, P_r – коэффициенты положения светопрозрачной поверхности соответственно для прямой, рассеянной и отраженной радиации; f_s, f_d, f_r – коэффициенты пересчета солнечной радиации, проходящей через светопрозрачную поверхность на ее тепловоспринимающую поверхность; $K_{пер}$ – коэффициент, учитывающий влияние рам окон; $K_{заг}$ – коэффициент, учитывающий загрязнение стекла; $\beta_{сз}$ – коэффициент теплопропускания солнцезащитных устройств; r – коэффициент отражения солнечного излучения от земли.

Метод определения всех параметров уравнения (5) приведен в [12].

Кроме того, расчетом определяется коэффициент эффективности η , показывающий какая часть теплоты солнечной радиации, поглощаемой системой ПСО, расходуется на отопление.

Математическому моделированию процессов аккумуляции теплоты посвящено значительное количество работ [13...19].

Без учета неизотермичности фильтрации теплоносителя математическая формулировка задачи теплопереноса в геотермальной циркуляционной системе имеет вид [20]:

$$\lambda_\tau \frac{1}{z} \frac{\partial}{\partial z} \left(z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = c_\tau T_\tau \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad 0 < z < \frac{a}{2}; \quad (6)$$

$$-c_{ж} \overline{W} grad T - S_v \lambda_\tau \frac{\partial T}{\partial z} = c_{ж} \rho_{ж} m_\tau \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad z = \frac{a}{2}; \quad (7)$$

$$div \overline{W} = 0; \quad (8)$$

$$T \Big|_{z=\frac{a}{2}} = T_b; \quad (9)$$

$$T \Big|_{\tau=0} = T_0; \quad (10)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0; \quad (11)$$

$$G_k = H \int_{\Gamma_k} (\overline{W} \bar{l}) d\Gamma_k, \quad (12)$$

$$\overline{W} = W_x \bar{i} + W_y \bar{j};$$

где

$$\text{grad} T = \frac{\partial T}{\partial x} \bar{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \bar{j}; \quad T_{жс} = T_T \Big|_{z=\frac{a}{2}}, \quad \kappa = 1, 2, 3 \dots n,$$

i, j – единичные векторы прямоугольной системы координат; Γ – контур источника (стока); \bar{i} – внешняя нормаль к Γ ; n – число скважин; G_k – массовый расход теплоносителя через k -ю скважину; a – линейный размер блоков; T – температура; z – координата в направлении, нормальном к плоскости фильтрации теплоносителя; c – удельная теплоемкость; λ – теплопроводность; W – скорость движения промывочной среды в скважине; \overline{W} – массовая скорость фильтрации; H – мощность зоны фильтрации; ρ – плотность; m_T – трещинная пористость; S_v – поверхность; $T_{жс}$ – температура теплоносителя; T_0 – начальная температура горных пород; T_B – температура теплоносителя на входе в геотермальную циркуляционную систему; индексы «т», «ж» – относятся соответственно к породам и теплоносителю.

Метод оптимизации рекуперативных теплообменных аппаратов (например, типа трубки Фильда), основанный на теоретико-графовых построениях и на эксергетическом анализе, изложен в [21].

Метод расчета тепловых аккумуляторов с твердым материалом (ТАМ) и с пористой матрицей изложим по методу, приведенному в [22].

Система уравнений, описывающая процессы передачи теплоты между теплоносителем и твердым аккумулирующим материалом, имеет вид:

для теплоносителя

$$\frac{m}{1-m} \left(\frac{\rho_{жс} c_{v,жс}}{\rho_m c_m} \right) \frac{\partial \Theta_{жс}}{\partial(\tau/\tau_0)} + \frac{\partial \Theta_{жс}}{\partial x} = \overline{Q}(\Theta_m - \Theta_{жс}); \quad (13)$$

для аккумулирующей среды

$$\frac{\partial \Theta_m}{\partial(\tau/\tau_0)} = \overline{Q}(\Theta_{жс} - \Theta_m) + \frac{\lambda_{c.o}}{\lambda_{o.c}} \frac{\partial^2 \Theta_m}{\partial x^2}. \quad (14)$$

В уравнениях (13) и (14) приняты обозначения: m – пористость; $\rho_{жс}$ и ρ_m – соответственно плотность теплоносителя и ТАМ; $c_{v,жс}$ – теплоемкость теплоносителя при постоянном объеме; c_m – удельная теплоемкость ТАМ; $\Theta = (t - t_0)\Delta/t_0$ – безразмерная температура; t_0 – температура окружающей среды; τ – время; $\tau_0 = \rho_m c_m x_0 (1 - m) / [(\nu\rho)c_{p,жс}]$ – обобщенное время; $(\nu\rho)$ – массовая скорость; $c_{p,жс}$ – теплоемкость теплоносителя при постоянном давлении; $x_0 = \lambda / (\nu\rho) c_{p,жс}$ – характерная длина; $\bar{x} = x/x_0$ – безразмерная длина; $\lambda_{c.o}$ – совокупное значение теплопроводности в осевом направлении; $\lambda_{c.o}$ – теплопроводность окружающей среды.

Методом компьютерного моделирования на основе CFD-технологии был выполнен расчет полей скорости и давления в аккумуляторе с пористой матрицей. Аккумулятор представлял собой бак размером $2 \times 2 \times 3$ м, заполненный гравием в виде круглых шаров диаметром 50 мм. Расчет трехмерных нестационарных полей проводился в режиме зарядки и разрядки путем численного решения уравнений Навье-Стокса с помощью компьютерной программы STAR-CD.

На рис. 2 и 3 приведены закономерности изменения температуры в среднем сечении аккумулятора теплоты в режимах соответственно зарядки и разрядки для различных моментов времени.

Можно сделать вывод, что указанным методом расчета можно получить полные сведения о поле температур при заряде и разряде аккумулятора и, следовательно, конкретные рекомендации по повышению эффективности аккумулятора.

Приведем показатели эффективности теплового насоса при его работе с аккумулятором теплоты.

Показатель эффективности работы теплового насоса в общем виде представляет собою функцию среднего перепада температур в конденсаторе $\Delta\vartheta_{\kappa}$ и в испарителе $\Delta\vartheta_u$:

$$\varepsilon_{TH} = \eta_{\kappa} \frac{\Delta\vartheta_{\kappa} + T_g^{cp}}{\Delta\vartheta_{\kappa} + T_g + \Delta\vartheta_u - T_f^{cp}}. \quad (15)$$

В случае работы теплового насоса с солнечным контуром, в состав которого входит бак-аккумулятор, формула (15) приобретает вид:

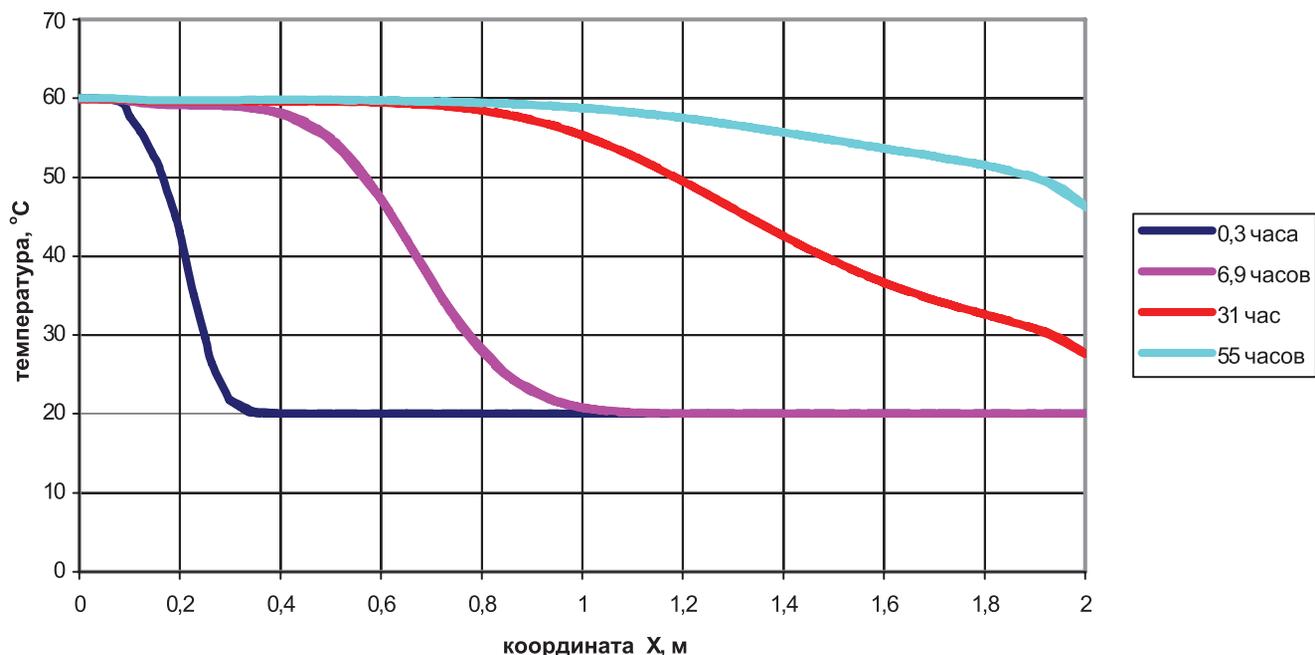


Рис. 2. Зависимость температуры в среднем сечении аккумулятора теплоты в режиме зарядки для различных моментов времени.

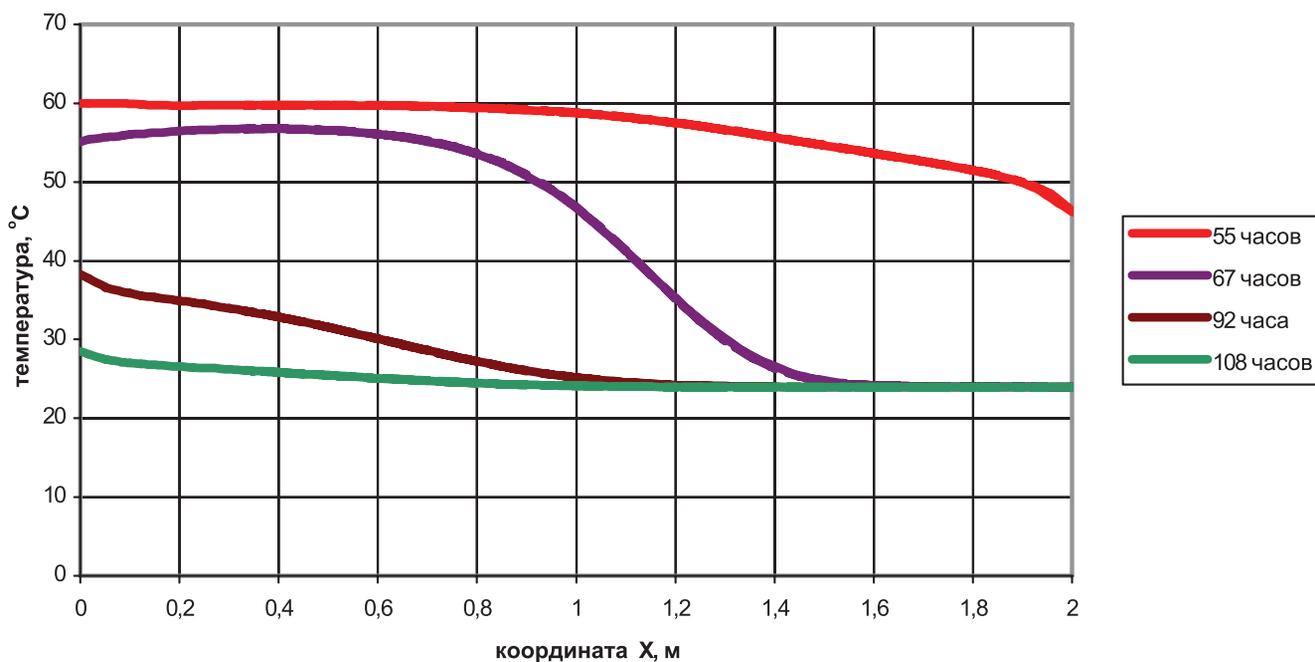


Рис. 3. Зависимость температуры в среднем сечении аккумулятора теплоты в режиме разрядки для различных моментов времени.

$$\varepsilon_{ТН}^c = \eta_{\kappa} \frac{\Delta\vartheta_{\kappa} + T_{\theta}^{om}}{\Delta\vartheta_{\kappa} + T_{\theta}^{om} + \Delta\vartheta_{ul} - T_s}, \quad (16)$$

где T_{θ}^{om} , T_s — соответственно, средняя темпера-

тура жидкости в контуре теплового потребителя и в баке-аккумуляторе теплоты гелиоколлектора.

В случае работы теплового насоса с почвенным контуром, когда используется “почвенный” испаритель, последняя формула приобретает вид:

$$\varepsilon_{ТН}^{cp} = \eta_{\kappa} \frac{\Delta\vartheta_{\kappa} + T_{\varepsilon}^{om}}{\Delta\vartheta_{\kappa} + T_{\varepsilon}^{om} + \Delta\vartheta_{u2} - T_f^{cp}}, \quad (17)$$

где T_f^{cp} – средняя температура рабочей жидкости контура почвенных теплообменников, что является источником теплоты для “почвенного” испарителя ТН; η_{κ} – КПД эквивалентного цикла Карно; $\Delta\vartheta_{\kappa}$ – разность температур в конденсаторе; $\Delta\vartheta_u$ – разность температур в испарителе; T_{ε}^{om} – средняя температура жидкости в контуре теплового потребителя.

Изложенные выше методы расчета позволяют определить показатели рассматриваемой комплексной системы теплоснабжения энерго-эффективного здания.

Оптимизацию системы теплоснабжения при наличии нескольких различных источников теплоты рекомендуется выполнять методом термоэкономической оптимизации [23].

Выводы

Использование альтернативных источников энергии, включая систему аккумулирования теплоты, приводит к существенному повышению энергоэффективности здания. Оптимальное решение указанной задачи должно основываться на методе термоэкономической концепции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Денисова А.Е., Мазуренко А.С., Тодорцев Ю.К., Дубковский В.А. Использование энергии грунта в теплонасосных гелиосистемах энергоснабжения // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2000. – № 1, С. 27-31.
2. Накорчевский А.И., Басок Б.И., Беляева Т.Г. Проблемы грунтового аккумулирования теплоты и методы их решения // Промышленная теплотехника. – 2003. – Т. 25, № 3. – С. 42-50.
3. Денисова А.Е., Мазуренко А.С., Тодорцев Ю.К. Модель комплексной альтернативной системы теплоснабжения // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2000. – № 5. – С. 8-12.
4. Басок Б.И., Накорчевский А.И., Беляева Т.Г. и др. Экспериментальный модуль гелиотермальной установки для теплоснабжения // Промыш-

ленная теплотехника. – 2006. – Т. 28, № 1. – С. 69-78.

5. Пleshка М. Солнечный дом-здание с эффективным использованием энергии // Eficienta energetica a cladirilor. Seminar cu participare internationala. – 16-17 noiembrie 2006. – Chisinau. – Pp. 61-70.

6. De Vore J.B., Snow J.E., Cambliano R.L. A solar drying process and apparatus // Научно-практическая конференция “Современные энерго-сберегающие тепловые технологии”. – М.: Т. 4, 2002. – С. 136-138.

7. Табунициков Ю.А., Бродач М.М. научные основы проектирования энергоэффективных зданий // АВОК. – Пресс, 2002. – 250 с.

8. Даффи Дж.А., Бекман У.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. – М.: Мир, 1977. – 420 с.

9. Системы солнечного тепло- и холодно-снабжения / Р.Р. Аvezов, М.М. Барский-Зорин, И.М. Васильева и др.; Под ред. Э.В. Сарнацкого и С.А. Чистовича. – М.: Стройиздат. – 1990. – 328 с.

10. Сивораक्षा В.Ю., Марков В.П., Петров Б.Е. та ін. Теплові розрахунки геліосистем. Моногр. – Д.: Вид-во Дніпропетр. ун-ту, 2003. – 132 с.

11. Сивораक्षा В.Ю., Золотко К.Е., Марков В.Л., Петров Б.Е. Гелиосистемы для отопления и горячего водоснабжения: Учебн. пособие. – Д.: ДГУ, 1995. – 196 с.

12. Проектування систем теплопостачання сільського господарства: Навч. посіб. / Б.Х. Драганов, О.С. Бесараб, А.В. Міщенко, В.В. Шутю; За ред. Б.Х. Драганова. – К.: Техніка, 2003. – 161 с.

13. Драганов Б.Х., Долинский А.А., Мойсейкина И.И. Тепломассоперенос в неоднородном пласте подземных аккумуляторов теплоты // Депонировано в ГАТБ Украины. 07.02.94, № 243-Ук-94. – С. 8.

14. Накорчевский А.И., Недбайло А.Н., Басок Б.И. Экспериментальная проверка достоверности математических моделей грунтового аккумулирования теплоты // Промышленная теплотехника. – 2006. – Т. 28, № 2. – С. 51-61.

15. Денисова А.Е. Математическое моделирование в грунтовой системе теплоснабжения // Труды Одесского политехнического университета. – 2000. – Вып. 1(10). – С. 87-92.

16. Conti M., Bellecci C., Charach Ch. Thermodynamic Design of a Phase Change Thermal Storage Module // Journal of Solar Energy Engineering. – 1996. – Vol. 118, № 5. – PP. 89-96.
17. Prasad R., Rao D.P. Theoretical Performance of a Solar Pond With Enhanced Ground Energy Storage // Journal of Solar Energy Engineering. – 1996. – Vol. 118, May. – PP. 101-106.
18. Zubair S.M., Al-Naglah M.A. Thermoeconomic Optimization of a Sensible-Heat Thermal Energy-Storage System: A Complete Storage Cycle // ASME. Journal of Energy Resources Technology. – 1999. – Vol. 121, № 4. – PP. 286-294.
19. Kangas M.T. Thermohydraulic Analysis of Ground as a Heat Source for Heat Pumps Using Vertical Pipes // ASME. Journal of Energy Resources Technology. – 1996. – Vol. 118, № 12. – PP. 301-305.
20. Мерзляков Э.И., Рыженко И.А., Цирульников А.С. Аналитическое решение теплопереноса в подземных циркуляционных системах // Докл. АН УССР. Серия А. – 1978. – С. 77-81.
21. Бессараб А.С., Долинский А.А., Драганов Б.Х. Оптимизация утилизационных теплообменных аппаратов // Пром. теплотехника. – 2004. – Т. 26, № 1. – С. 32-36.
22. Adebisi G.A., Chenevert D.J. An Appraisal of One-Dimension Analytical Models for the Packed Bed Thermal Storage System Utilizing Sensible Heat Storage Materials // ASME. Journal of Energy Resources Technology. – 1996, Vol. 118, № 1. – PP. 44-49.
23. Драганов Б.Х. Термoeкономическая оптимизация энергетических систем при эксплуатационном и экологическом режимах их работы // Экотехнология и ресурсосбережение. – 2006. – № 2. – С. 8-10.

Получено 25.06.2007 г.

УДК 533.6\664.65

БАСОК Б.И., НАКОРЧЕВСКИЙ А.И., ПЕТРЕНКО Н.П., ХИБИНА М.А.

Институт технической теплофизики НАН Украины

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЫПЕЧКЕ ХЛЕБА В ПЕЧИ ГТП-135

Запропоновано замкнутую схему рівнянь, яка дозволяє описати динаміку теплових і масопереносних процесів, які відбуваються в тісті-хлібі при формовому випіканні конвективним теплоносієм. Складено алгоритм спряженої задачі, яка пов'язує теплоаеродинамічні параметри теплоносія з внутрішніми характеристиками виробів.

Предложена замкнутая система уравнений, позволяющая описать динамику тепловых и массопереносных процессов, происходящих в тесте-хлебе, при формовой выпечке конвективным теплоносителем. Составлен алгоритм сопряженной задачи, связывающей теплоаэродинамические параметры теплоносителя с внутренними характеристиками изделий.

A closed system of the equations, allowing describe the heat-and-mass transfer dynamics of the processes, occurring in a dough-bread, when form bread is baking by the convection heat carrier is proposed. An algorithm of the dual problem, connecting heat-aerodynamic parameters of heat carrier with internal feature product is developed.

A, B, C – параметри;

a – коефіцієнт температуропроводності;

c – удельная теплоемкость;

h – высота слоя;

i – номер слоя;

M – масса;

q – плотность теплового потока;

S – площадь;

T – температура;

t – время;

u – скорость;

z – координата;

δ – приведенная толщина форм;

λ – удельная теплопроводность;