

2. Rees, S. J. An introduction ground – source heat pump technology [Text] / S. J. Rees // *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*. – Elsevier BV, 2016. – P. 1–25. doi:10.1016/b978-0-08-100311-4.00001-7
3. Dong, X. A New Method to Determine the Thermal Properties of Soil for Vertical-Borehole Ground-Source Heat Pump Systems [Text] / X. Dong, B. Gu // *Heat Transfer Research*. – 2015. – Vol. 46, № 5. – P. 417–427. doi:10.1615/heattransres.2014007228
4. Lü, C. Research on Soil Heat Balance Theory of Ground Coupled Heat Pump System [Text] / C. Lü, F. Yu, M. Zheng, J. Zhong // *Geo-Informatics in Resource Management and Sustainable Ecosystem*. – Springer Science + Business Media, 2016. – P. 855–861. doi:10.1007/978-3-662-49155-3\_88
5. Haddada, J. Thermal Performance and Characteristics of Spiral-Tube Ground Heat Exchanger for Ground-Source Heat Pump [Text] / J. Haddada, A. Miyara // *Proceedings of the 15th International Heat Transfer Conference*. – 2014. – 14 p. doi:10.1615/ihtc15.hex.009412
6. Rees, S. J. Horizontal and compact ground heat exchangers [Text] / S. J. Rees // *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*. – Elsevier BV, 2016. – P. 117–156. doi:10.1016/b978-0-08-100311-4.00005-4
7. Кордас, О. Моделирование энергетических характеристик геотермальных систем [Текст] / О. Кордас, Е. И. Никифорович // *Прикладна гідромеханіка*. – 2014. – Т. 16, № 1. – С. 42–52.
8. Zhou, S. Feasibility study on two schemes for alleviating the underground heat accumulation of the ground source heat pump [Text] / S. Zhou, W. Cui, Z. Li, X. Liu // *Sustainable Cities and Society*. – 2016. – Vol. 24. – P. 1–9. doi:10.1016/j.scs.2016.03.014
9. Чайковская, Е. Е. Согласование производства и потребления энергии на основе интеллектуального управления тепло-массообменными процессами [Текст] / Е. Е. Чайковская // XV Минский международный форум по теплообмену. Секция 8. Теплоассоуперенос в энергетических процессах и оборудовании. Энергосбережение, 23-26 мая 2016 г. – Минск: Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2016. – С. 1–12.
10. Чайковська, Є. Є. Інформаційні технології підтримки функціонування енергетичних систем на рівні прийняття рішень [Текст] / Є. Є. Чайковська // *Збірник тез доповідей IV Українсько-німецької конференції «Інформатика. Культура. Техніка». Інформаційні системи та технології*. – Одеса, 2016. – С. 32–33.

#### РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОДДЕРЖАНИЯ РАЗРЯДА ГРУНТА В ТЕПЛОНАСОСНОМ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИИ

Предложен метод поддержания разряда грунта на основе прогнозирования изменения температуры грунта при измерении температуры рассола на выходе из испарителя теплового насоса. Использование полученной интегрированной системы оценки изменения температуры грунта в составе динамической системы: грунтовый теплообменник – испаритель теплового насоса позволяет принимать решения на изменение расхода рассола на основе изменения частоты вращения электродвигателя циркуляционного насоса и устанавливать точный срок разряда грунта.

**Ключевые слова:** теплонасосная установка, грунтовой теплообменник, математическое и логическое моделирование, принятие решений.

*Чайковська Євгенія Євстафіївна, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент, кафедра теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики, Одеський національний політехнічний університет, Україна, e-mail: eechaikovskaya@gmail.com.*

*Чайковская Евгения Евстафьевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент, кафедра теоретической, общей и нетрадиционной энергетики, Одесский национальный политехнический университет, Украина.*

*Chaikovskaya Eugene, Odessa National Polytechnic University, Ukraine, e-mail: eechaikovskaya@gmail.com*

УДК 621.365

DOI: 10.15587/2312-8372.2016.74755

Левченко С. А.

## ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА ЕГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

*Предложено использовать для автономных источников горячего водоснабжения электрический теплоаккумулирующий преобразователь, принцип действия которого основан на прямом нагреве теплоаккумулирующего вещества протекающим через него током. Получены зависимости между геометрическими размерами и электротепловыми характеристиками преобразователя. Рассмотрена методика определения оптимальных основных конструктивных параметров электрического теплоаккумулирующего преобразователя для систем солнечного теплоснабжения с использованием предложенной математической модели.*

**Ключевые слова:** прямой нагрев, электрический теплоаккумулирующий преобразователь, метод вторичных источников, математическая модель.

### 1. Введение

В составе гелиоустановок горячего водоснабжения и отопления обязательно присутствуют аккумуляторы

тепла (в простейшем случае – бак для горячей воды). Необходимость накопления тепловой энергии в таких установках вызвана, прежде всего, тем, что период прихода солнечного излучения на коллектор, как правило,

не совпадает с периодом использования полученного тепла. При этом баки-аккумуляторы позволяют лишь сгладить колебания температуры в системе. Если температура воды недостаточна, то ее необходимо догреть или переходить на централизованное отопление и горячее водоснабжение.

Очевидно, что использование бака-аккумулятора приводит к удорожанию конструкции гелиоустановки. Экономически более выгодно решить указанную проблему путем применения электрического теплоаккумулирующего преобразователя (ЭТАПа) [1]. Его преимущество заключается в том, что можно обойтись без бака-аккумулятора, а тепловую энергию накапливать в промежуточном теплоносителе за счет потребления из сети электрической энергии во внепиковое время по соответствующему минимальному тарифу. При нехватке тепловой энергии, поступающей от солнечного коллектора, ее дополнительное количество можно брать от электрического теплоаккумулирующего преобразователя.

Предлагаемый преобразователь может быть с успехом использован для повышения эффективности систем солнечного теплоснабжения, что позволит снизить потребление газа или других видов топлива, а в некоторых случаях и вовсе отказаться от них. Правильно спроектированный ЭТАП для конкретной системы солнечного теплоснабжения снизит срок окупаемости последней, что и обуславливает актуальность проведенного исследования.

## 2. Объект исследования и его технологический аудит

*Объект исследования* — электрический теплоаккумулирующий преобразователь.

Для обеспечения максимальной энергоэффективности предлагаемого преобразователя необходимо решить оптимизационную задачу выбора его конструктивных параметров и вида используемого теплоносителя, обеспечивающих наилучшие показатели по накоплению энергии (объемному распределению мощности), динамике накопления и последующей отдаче тепла в систему. Изменения этих параметров позволяет регулировать объемное распределение мощности в рабочем пространстве, а, следовательно, и картину теплового поля. Распределение тока и мощности в объеме накопителя определяется, главным образом, его геометрическими параметрами.

Разнообразие и сложность геометрических форм и размеров современного электрооборудования, все более жесткие требования, предъявляемые к точности их расчета, указывают на ограниченную область применения аналитических методов для такого расчета, а, с другой стороны, подчеркивают актуальность разработки универсальных численных алгоритмов расчета, в данном случае — электромагнитных полей, ориентированных на применение вычислительных технологий. Располагая подобными алгоритмами, позволяющими варьировать геометрическими параметрами, свойствами материалов и другими характеристиками, можно заменить длительный эксперимент быстрым расчетом на ЭВМ различных вариантов и выбором оптимального из них. При этом создаются предпосылки автоматизации процесса проектирования таких теплоаккумулирующих преобразователей.

Принцип действия ЭТАПа основан на прямом нагреве теплоаккумулирующего вещества протекающими через него токами промышленной частоты от системы трехфазных напряжений. Конструкция такого преобразователя (рис. 1) определяется радиусом  $R_B$  и высотой  $H_B$  бака 1, радиусом  $R_Э$  и длиной  $L_Э$  электродов 2, радиусом распада электродов  $R_P$ .

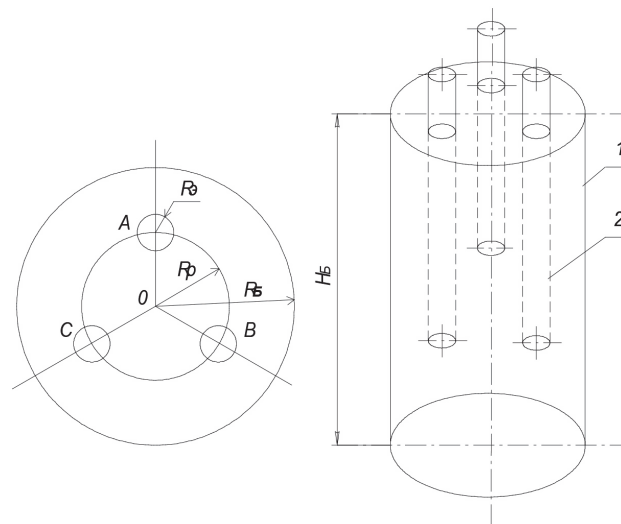


Рис. 1. Конструкция ЭТАПа

Недостатком такого ЭТАПа является сложность в определении его оптимальной конструкции и выборе теплоаккумулирующего материала.

## 3. Цель и задачи исследования

*Цель исследования* — разработка оптимальной конструкции ЭТАПа.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить такие задачи:

1. Создать математическую модель ЭТАПа.
2. Разработать компьютерную программу расчета температурного поля внутри бака.
3. Проверить адекватность математической модели на экспериментальной установке.
4. Определить оптимальные конструктивные параметры преобразователя, при которых нагрев теплоаккумулирующего материала происходит наиболее равномерно.

## 4. Анализ литературных данных

Во многих странах мира ведутся интенсивные поиски эффективных технических решений систем солнечного теплоснабжения (ССТ). В Армении с 1982 г. эксплуатируется двухэтажный жилой дом площадью 102,6 м<sup>2</sup> с системой солнечного отопления и горячего водоснабжения (ГВС) [2]. В системе установлен дублирующий источник тепла — газовый автоматический водонагреватель АГВ-120. Опыт эксплуатации этого дома и подобных объектов показал, что за счет солнечной энергии обеспечивается 55–70 % годового теплотребления, однако общий годовой КПД солнечной установки составляет всего 10...15 %, что приводит к удорожанию здания и высокой стоимости выработанного тепла.

Аналогичные установки имеются и в других странах. В Крымпине, Румыния, в 1977 г. начал эксплуатироваться

четырёхквартирный жилой дом площадью 200 м<sup>2</sup> с жидкостной ССТ. Солнечные коллекторы (СК) имеют площадь 78 м<sup>2</sup>. Параметры теплоносителя 55...30 °С. Дублер — электрокотел вместимостью 2 м<sup>3</sup> и мощностью 15 кВт. Средний коэффициент замещения тепла в отопительный период составляет 40 %, при этом срок окупаемости установки на начальный период составлял 35 лет.

В США построено много односемейных жилых домов с солнечными установками отопления и ГВС. Дублирующим источником в этих установках являются электрокотлы, котлы на жидком топливе, газовые котлы, тепловые насосы.

В 1984 г. вошла в строй установка ГВС гостиницы «Акация» в Варне. СК имеют площадь 170 м<sup>2</sup>, баки-аккумуляторы вместимостью 9,6 м<sup>3</sup>. Дублирующим источником тепла служат бойлеры мощностью 18 кВт.

В Бухаресте эксплуатируется крупная установка с СК общей площадью 5 тыс. м<sup>2</sup>, которые установлены на крышах 45 зданий. Аккумуляторы имеют общую вместимость 200 м<sup>3</sup>. В летнее время установка обеспечивает 50 % энергии для нужд ГВС.

На курорте Майами эксплуатируются системы ГВС комплекса гостиниц. СК имеют общую площадь свыше 2,5 тыс. м<sup>2</sup>. Дублирующим источником тепла служат котельные на жидком топливе [3].

Несмотря на значительное число разнообразных аккумуляторов солнечного тепла экономическая эффективность их применения не всегда очевидна. При децентрализованном теплоснабжении рекомендуется использовать комбинированные системы солнечно-электрического теплоснабжения с аккумулятированием тепла во внепиковый период [3–6].

Для улучшения конструкции ЭТАПа заслуживает внимания работа [7], в которой на основе математического моделирования получены данные для трехмерного распределения магнитного поля, плотности тока и мощности печи. Представляет интерес работа [8]. В ней приводятся результаты изучения распределения мощности и эффективных сопротивлений электрода и расплава в электропечи, причем за основу методики теоретического исследования электрических параметров берется одноэлектродная осесимметричная модель. Методика получена на основании уравнений Максвелла в форме системы дифференциальных уравнений в частных производных, которая решается численными методами на ЭВМ. Результаты расчета представлены в виде картин распределения плотности тока для различной геометрии печи и электродов.

## 5. Материалы и методы исследований

Трехмерная математическая модель ЭТАПа построена в виде системы интегральных уравнений по методу вторичных источников [9]. Решающее преимущество

этого метода перед другими заключается в возможности построения универсальных и эффективных численных алгоритмов расчета полей, ориентированных на использование ЭВМ и приспособленных для неоднородных сред и сложных форм их границ. Метод вторичных источников допускает расчет электрических и магнитных полей путем введения вторичных дополнительных источников в расчетную систему интегральных уравнений Фредгольма II рода. Для создания компьютерной программы эта система интегральных уравнений преобразуется в систему алгебраических уравнений [10].

## 6. Результаты исследования

**6.1. Расчет электрической мощности ЭТАПа по заданным конструктивным параметрам.** Расчет электрической мощности ЭТАПа выполняется по разработанной на кафедре эффективности энергообеспечения Запорожской государственной инженерной академии компьютерной программе «Furnace». Данная программа позволяет рассчитать электрическую мощность, выделяемую в каждом элементарном объеме ЭТАПа методом вторичных источников [9, 10] и его температурное поле по следующим исходным данным, указанным на панели ввода Form1, изображенной на рис. 2.

The screenshot shows a software interface titled 'Form1' with a menu bar (Parameters, Calculation, Preview, Exit). The main area contains several input fields and buttons:

- Parameters of the tank:** Height (0.1500), Radius (0.0500).
- Parameters of the electrodes:** Length (0.1300), Radius (0.0025), Gap radius (0.0346), Thermal conductivity (460.00), Thermal conductivity (50.0000), Density (7850.00).
- Thermal conductivity coefficients:** Grid for 'Without cooling' and 'With cooling' with values for Top, Side, and Bottom.
- Material properties:** Specific heat (1300.00), Thermal conductivity (1.1000), Density (1150.00).
- Discretization of geometry:** Buttons for Tank, Electrodes, and Volume discretization.
- Time parameters:** Start of heating (0), End of heating (180), Start of cooling (180), End of cooling (360), Calculation cycle (1), Save values (180).
- Electrical parameters:** Current amplitude (10), Conductivity (0.5), Time moment (0).
- Temperature parameters:** Grid for temperature distribution (a6 to a0) for 'Without cooling' and 'With cooling', and initial tank temperature (0).

Рис. 2. Панель ввода исходных данных для расчета электрической мощности и тепловых характеристик ЭТАПа по программе «Furnace»

В результате исследования влияния конструктивных параметров ЭТАПа и характеристик теплоаккумулирующего вещества на электрическую мощность преобразователя были получены следующие зависимости.

6.1.1. Зависимость электрической мощности ЭТАПа от радиуса распада электродов  $P = f(R_p)$  при следующих неизменных параметрах (рис. 3):

- высота бака  $H_B = 0,15$  м;
- радиус бака  $R_B = 0,05$  м;
- длина электродов  $L_{\text{Э}} = 0,13$  м;
- радиус электродов  $R_{\text{Э}} = 0,0025$  м;
- электрический ток  $I = 10$  А;
- проводимость среды  $\gamma = 0,5$  1/Ом·м.

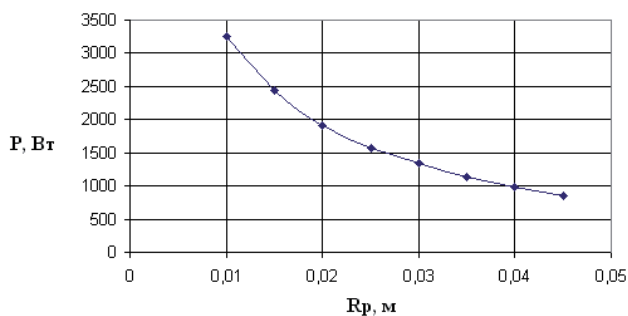


Рис. 3. Зависимость электрической мощности ЭТАПа от радиуса распада электродов  $P = f(R_p)$

Анализ графика (рис. 3) показывает, что при увеличении радиуса распада электродов  $R_p$  электрическая мощность ЭТАПа  $P$  уменьшается нелинейно вследствие уменьшения средней плотности тока растекания в объеме ЭТАПа.

6.1.2. Зависимость электрической мощности ЭТАПа от радиуса электродов  $P = f(R_\Delta)$  при следующих неизменных параметрах (рис. 4):

- высота бака  $H_B = 0,15 \text{ м}$ ;
- радиус бака  $R_B = 0,05 \text{ м}$ ;
- длина электродов  $L_\Delta = 0,13 \text{ м}$ ;
- радиус распада электродов  $R_p = 0,0346 \text{ м}$ ;
- электрический ток  $I = 10 \text{ А}$ ;
- проводимость среды  $\gamma = 0,5 \text{ 1/Ом}\cdot\text{м}$ .

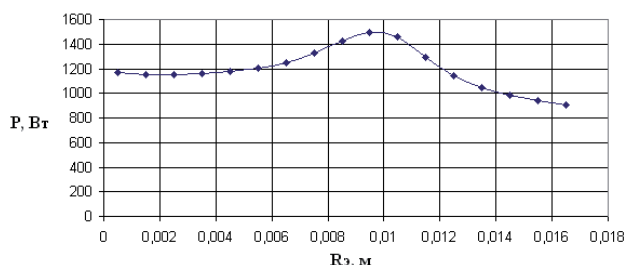


Рис. 4. Зависимость электрической мощности ЭТАПа от радиуса электродов  $P = f(R_\Delta)$

Анализ графика (рис. 4) показывает сложный характер зависимости электрической мощности преобразователя от радиуса электродов с наличием явного экстремума функции, который соответствует оптимальному соотношению между радиусом распада электродов и радиусом электродов. Можно установить, что при радиусе распада  $R_p = 0,0346 \text{ м}$  оптимальным радиусом электродов является  $R_\Delta = 0,0095 \text{ м}$ . Таким образом, оптимальным соотношением будет  $R_p/R_\Delta = 3...4$ .

6.1.3. Зависимость электрической мощности ЭТАПа от соотношения между высотой и радиусом бака  $P = f(H_B/R_B)$  при следующих неизменных параметрах (рис. 5):

- электрический ток  $I = 10 \text{ А}$ ;
- проводимость среды  $\gamma = 0,5 \text{ 1/Ом}\cdot\text{м}$ ;
- соотношения  $R_p/R_B = 0,65$ ;  $R_p/R_\Delta = 3,6$ .

Анализ графика (рис. 5) показывает, что оптимальным соотношением высоты бака к радиусу бака  $H_B/R_B = 4...6$ , так как при этом возникают оптимальные условия растеканию тока в объеме теплоаккумулирующего вещества ЭТАПа.

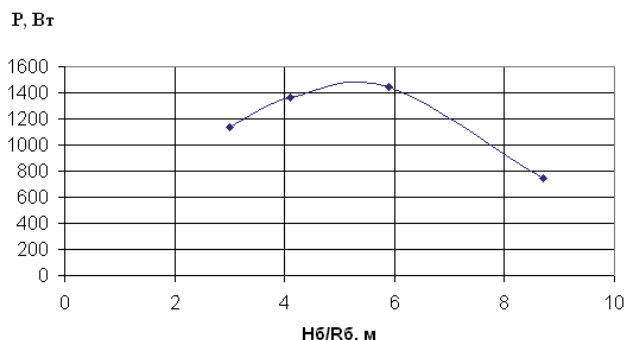


Рис. 5. Зависимость электрической мощности ЭТАПа от соотношения высоты бака к радиусу бака  $P = f(H_B/R_B)$

**6.2. Расчет температурного поля в ЭТАПе и определение его оптимальных конструктивных параметров.**

Оптимальным режимом накопления тепловой энергии является режим равномерного нагрева электрического теплоаккумулирующего преобразователя по всему объему. Ток, стекающий с торцов, а так же с внешней части боковой поверхности электродов, замыкается на проводящий бак и на противоположные боковые поверхности электродов. При этом работают две схемы растекания тока: «звезда» (электроды – проводящий бак) и «треугольник» (между электродами). Преобладание «звезды» приводит к повышенному нагреву наружных слоев теплоаккумулирующего вещества и бака, а треугольника – внутренних. При этом в приэлектродных областях могут возникать локальные высокие плотности тока и, следовательно, большие тепловыделения, которые могут привести к пережогу электродов и изменению физических свойств материала наполнителя.

Отсюда вытекает задача нахождения оптимальных конструктивных параметров ЭТАПа для получения равномерного тепловыделения в объеме бака и времени накопления тепловой энергии. По разработанной на кафедре программе «Fugase» расчета температур в заданных элементарных объемах (элементарные объемы задаются в цилиндрических координатах  $r, \phi, z$ ) при различных радиусах распада электродов и постоянных остальных параметрах получены кривые распределения температур в произвольный момент времени в элементарных объемах бака (рис. 6). Математическая и опытная модели показали оптимальное соотношение радиуса распада к радиусу бака  $R_p/R_B = 0,6...0,7$ .

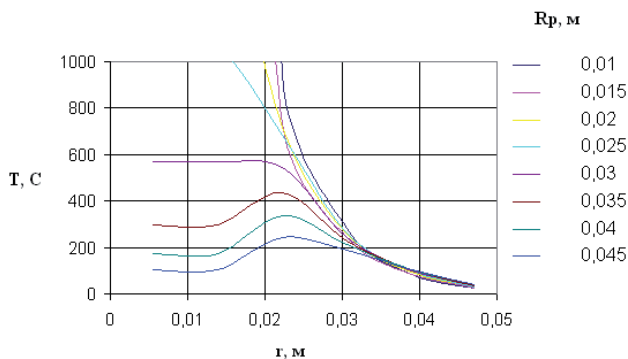


Рис. 6. Распределение температуры  $T$  в баке от расстояния от оси  $r$  при различных радиусах распада электродов  $R_p$  и направлении радиус-вектора  $\phi = 90^\circ$



Очевидно, что температура в заданной области будет зависеть от направления радиус-вектора. Направление радиус-вектора  $\varphi$  отсчитывается против движения часовой стрелки от фазы А.

Для выявления связи параметров преобразователя также исследовалось влияние глубины погружения электродов на распределение температуры в баке преобразователя. Анализ построенных зависимостей показывает, что с увеличением глубины погружения электродов при оптимальном их распада температура в объеме бака перераспределяется по глубине, а не по удалению от центра.

Практическое использование алгоритма распределения активной электрической мощности в объеме бака по методу вторичных источников [11, 12] при расчете электрических характеристик и геометрических параметров трехфазного ЭТАПа круглого сечения выглядит следующим образом.

1. Определение основных электрических характеристик и геометрических параметров накопителя с помощью известных инженерных методов расчета.

2. Расчет по математической модели проектируемого преобразователя при различных значениях радиуса распада электродов распределения активной мощности в объеме бака.

3. Выявление критических точек с максимальной и минимальной температурами.

4. Уточнение радиуса распада электродов по построенным графическим зависимостям вида  $P_i(T_i) = f(R_p)$ .

5. Корректировка геометрических параметров накопителя на основании полученного радиуса распада электродов.

Предложенная методика расчета позволит полнее решить задачи проектирования ЭТАПа.

Таким образом, зная необходимый объем бака ЭТАПа, для обеспечения необходимой тепловой нагрузки ГВС можно по найденным ранее соотношениям ( $R_p/R_B = 0,6...0,7$ ;  $R_p/R_{\Sigma} = 3...4$ ;  $H_B/R_B = 4...6$ ) спроектировать конструкцию ЭТАПа.

**6.3. Апробирование методики путем натуральных экспериментов.** Для подтверждения теоретических расчетов были проведены натурные эксперименты по определению электротепловых характеристик электрического теплоаккумулирующего преобразователя. Эксперименты проводились на опытной установке, состоящей из стального цилиндрического бака, трех стальных круглых электродов, асбестовой крышки, теплоаккумулирующего материала (рис. 7). В качестве теплоаккумулирующего вещества использовалась смесь песка с графитом в разных соотношениях.



Рис. 7. Опытный образец ЭТАПа

Сравнивая результаты экспериментов и результаты, полученные на математической модели с использованием расчетной программы «Furnace», был сделан вывод о их практическом совпадении, что подтверждает адекватность модели. Относительная погрешность результатов при разном процентном содержании компонентов теплоаккумулирующего материала не превысила  $\delta = 4,2$  %.

## 7. SWOT-анализ результатов исследования

Применение ЭТАПа повышает эффективность систем солнечного теплоснабжения, что приводит к снижению потребления природного газа и других видов ископаемого топлива.

Использование сложного математического аппарата при построении математической модели преобразователя может привести к неоптимальной конструкции последнего.

Перспективным является дальнейшее исследование по подбору теплоаккумулирующего вещества.

Неопределенность ценовой политики на энергоресурсы затрудняет определить срок окупаемости ЭТАПа.

## 8. Выводы

1. На основании интегральных уравнений, используя метод вторичных источников, разработана математическая модель для расчета плотности вторичных источников, напряженности электрического поля и распределения удельной активной мощности и температуры в баке цилиндрического трехфазного электрического теплоаккумулирующего преобразователя.

2. Разработана компьютерная программа расчета распределения электрической мощности и температуры в объеме бака преобразователя.

3. Создана экспериментальная установка для проведения физических экспериментов по проверке адекватности математической модели преобразователя.

4. Определены оптимальные соотношения конструкции ЭТАПа:  $R_p/R_B = 0,6...0,7$ ;  $R_p/R_{\Sigma} = 3...4$ ;  $H_B/R_B = 4...6$ .

## Литература

1. Качан, Ю. Г. К вопросу моделирования систем солнечного теплоснабжения с целью повышения их энергоэффективности [Текст] / Ю. Г. Качан, С. А. Левченко // Интегровані технології та енергозбереження. — 2006. — № 3. — С. 3–6.
2. Калашян, М. С. Экспериментальный жилой дом с системой солнечного теплоснабжения в поселке Мерцван Армянской ССР [Текст] / М. С. Калашян, О. С. Попель, Э. Э. Шпильрайн // Гелиотехника. — 1986. — № 3. — С. 66–71.
3. Аvezов, Р. Р. Системы солнечного тепло- и хладоснабжения [Текст] / Р. Р. Аvezов, М. А. Барский-Зорин, И. М. Васильева и др.; под ред. Э. В. Сарнацкого, С. А. Чистовича. — М.: Стройиздат, 1990. — 328 с.
4. Танака, С. Жилые дома с автономным теплохладоснабжением [Текст] / С. Танака, Р. Суда; пер. с яп. Е. Н. Успенской; под ред. М. М. Колтуна, Г. А. Гухман. — М.: Стройиздат, 1989. — 184 с.
5. Бекман, У. Расчет систем солнечного теплоснабжения [Текст] / У. Бекман, С. Клейн, Дж. Даффи. — М.: Энергоиздат, 1982. — 80 с.
6. Типовой проект системы солнечного горячего водоснабжения с естественной циркуляцией для одноэтажных 2-3-4-5-комнатных жилых домов [Текст] / ТбилЗНИИЭП. — М.: Стройиздат, 1986. — 98 с.
7. Ekrann, S. A three-dimensional mathematical model for electromagnetic quantities in three phase electric reduction furnaces [Text] / S. Ekrann, A. Holmelid, T. Torp // 9th International Congress of Electroheat. — Cannes, 1980.

8. Heiss, W. D. Power density and effective resistance in the electrode and furnace of an electric smelter [Text] / W. D. Heiss // Electrowarm International. — 1981. — Vol. 39, № 5. — P. 226–249.
9. Тозони, О. В. Метод вторичных источников в электротехнике [Текст] / О. В. Тозони. — М.: Энергия, 1975. — 295 с.
10. Ольдзиевский, С. А. Математическое моделирование электрических полей печей рудной электротермии [Текст] / С. А. Ольдзиевский, В. А. Кравченко, В. И. Нежурич, И. А. Борисенко. — М.: Металлургия, 1990. — 113 с.
11. Качан, Ю. Г. К расчету объемного распределения мощности в электрическом теплоаккумулирующем преобразователе [Текст] / Ю. Г. Качан, С. А. Левченко // Интегрированные технологии та енергозбереження. — 2005. — № 2. — С. 150–153.
12. Качан, Ю. Г. Оптимизация конструктивных параметров электрического теплоаккумулирующего преобразователя в системах солнечного теплоснабжения [Текст] / Ю. Г. Качан, С. А. Левченко // Відновлювана енергетика. — 2007. — № 2. — С. 34–37.

**ВЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА НА ЙОГО ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

Запропоновано застосовувати для автономних джерел гарячого водопостачання електричний теплоаккумулюючий пере-

творювач, принцип дії якого засновано на прямому нагріві теплоаккумулюючої речовини струмом, що проходить крізь неї. Отримані залежності між геометричними розмірами та електротепловими характеристиками перетворювача. Розглянуто методику визначення оптимальних основних конструктивних параметрів електричного теплоаккумулюючого перетворювача для систем сонячного тепlopостачання з використанням запропонованої математичної моделі.

**Ключові слова:** прямий нагрів, електричний теплоаккумулюючий перетворювач, метод вторинних джерел, математична модель.

*Левченко Сергей Андреевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра эффективности энергообеспечения, Запорожская государственная инженерная академия, Украина, e-mail: levchenko\_s@rambler.ru.*

*Левченко Сергій Андрійович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра ефективності енергозабезпечення, Запорізька державна інженерна академія, Україна.*

*Levchenko Sergiy, Zaporizhzhya State Engineering Academy, Ukraine, e-mail: levchenko\_s@rambler.ru*

УДК 621.56

DOI: 10.15587/2312-8372.2016.74811

**Милованов В. И.,  
Балашов Д. А.**

**ПОВЫШЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНДЕНСАТОРА ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ С ПОМОЩЬЮ НАНОЧАСТИЦ**

*В статье приводится информация про перспективы применения наночастиц для улучшения термодинамических характеристик теплообменных аппаратов холодильной машины, работающей на изобутане. Влияние нанодобавок рассмотрено на примере экспериментального исследования конденсатора. Результаты свидетельствуют о повышении коэффициента теплопередачи в конденсаторе на 16–24 % в зависимости от режима работы.*

**Ключевые слова:** холодильная машина, наночастица, нанодобавка, коэффициент теплопередачи, коэффициент теплоотдачи, конденсатор, изобутан.

**1. Введение**

Эффективным направлением в энергосбережении, которое позволит снизить потребление электроэнергии является применение новых классов веществ в качестве рабочего тела. Проведенные в Украине и за рубежом исследования теплофизических свойств коллоидных растворов наночастиц с маслами и хладагентами показывают высокую перспективность использования подобного класса веществ в холодильной технике. Использование нанофлюидов позволяет существенно повысить тепло-массообменные характеристики хладагента, уменьшить температурные перепады на поверхностях конденсатора и испарителя и в результате снизить отношение давлений кипения и конденсации, а следовательно и потребляемую холодильной машиной электрическую мощность.

Из анализа опубликованной в прессе информации про влияние наноматериалов на работу малых холо-

дильных машин делается вывод, что большинство работ посвящено исследованию теплопроводности веществ с растворенными в них наночастицами. Данные о влиянии нанодобавок на работу теплообменных аппаратов малой холодильной машины в литературе практически отсутствуют. Это затрудняет поиск технических решений, направленных на повышение эффективности малых холодильников.

Таким образом, становятся актуальными работы по дальнейшим исследованиям малых холодильных машин с нанофлюидами в качестве рабочего тела.

Уменьшить потребление холодильной машиной электроэнергии возможно с помощью улучшения эффективности теплообменных систем. Новые теплоносители с улучшенными термодинамическими характеристиками являются одним из вариантов улучшения теплопередачи. Важным достижением в исследовании теплоносителей является применение коллоидной смеси основной