



ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ АВТОНОМНОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

С. И. Монах¹, А. А. Афанасьев², Л. П. Андриюшкина, Е. Н. Шапошник

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,

2, ул. Державина, г. Макеевка, ДНР, 86123.

E-mail: ¹ms0660101047@mail.ru, ²aleksey7536@ukr.net

Получена 06 июня 2018; принята 21 сентября 2018.

Аннотация. Мероприятия по экономии топливно-энергетических ресурсов в жилищно-коммунальном хозяйстве страны являются одним из приоритетных направлений развития малой энергетики. Внедрение тепловых аккумуляторов с твердым аккумулирующим материалом с пористой матрицей позволит использовать вторичные тепловые ресурсы, а именно теплоту уходящих газов для обогрева помещений, а значит для экономии топлива. Авторами предложена принципиальная конструктивная схема теплового аккумулятора, внедрение которой для частного дома позволит получить экономию природного газа не менее 15 % от годового расхода на отопление этого объекта.

Ключевые слова: аккумуляторы теплоты, твердый аккумулирующий материал, пористая матрица, период зарядки, период разрядки, нестационарная теплопроводность, охлаждение цилиндра конечной длины, принципиальная конструктивная схема теплового аккумулятора, экономическая эффективность.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ АВТОНОМНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

С. І. Монах¹, О. А. Афанасьєв², Л. П. Андриюшкіна, Є. М. Шапошник

ДОО ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»,

2, вул. Державіна, м. Макіївка, ДНР, 86123.

E-mail: ¹ms0660101047@mail.ru, ²aleksey7536@ukr.net

Отримана 06 червня 2018; прийнята 21 вересня 2018.

Анотація. Заходи щодо економії паливно-енергетичних ресурсів в житлово-комунальному господарстві є одним з пріоритетних напрямків розвитку малої енергетики. Застосування теплових акумуляторів з твердим матеріалом, що акумулює, з пористою матрицею дозволить використовувати вторинні теплові ресурси, а саме теплоту димових газів для обігріву приміщень, отже для економії палива. Авторами запропоновано принципову конструктивну схему теплового акумулятора, впровадження якої дозволить отримати економію природного газу не менш 15 % від річної витрати на опалення об'єкта.

Ключові слова: акумулятори теплоти, твердий матеріал, що акумулює, період зарядки, період розрядки, нестационарна теплопровідність, охолодження циліндра кінцевої довжини, принципова конструктивна схема теплового акумулятора, економічна ефективність.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF AUTONOMOUS HEAT SUPPLY SYSTEMS

Svetlana Monah¹, Aleksey Afanasev², Liliya Andrushkina, Evgeniy Shaposhnik

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,
2, Derzhavina Str., Makeyevka, DPR, 86123.*

E-mail: ¹ms0660101047@mail.ru, ²aleksey7536@ukr.net

Received 06 June 2018; accepted 21 September 2018.

Abstract. Events on the economy of fuel and energy resources in housing and communal services are one of priority directions of development of small energy. Introduction of thermal accumulators with hard heat-sink material with a porous matrix will allow to use secondary thermal resources, namely warmth of leaving gases for heating of apartments, and for the economy of fuel. The fundamental structural chart of thermal accumulator, introduction of that for a private house will allow to get the economy of natural gas no less than 15 % from an annual expense on heating of this object, offers authors.

Keywords: accumulators of warmth, hard heat-sink material (HSM), porous matrix, charging period, discharging period, non-stationary heat conductivity, cooling of cylinder of eventual length, fundamental structural chart of thermal accumulator, economic efficiency.

История развития и внедрения систем аккумуляции тепловой энергии на протяжении последних 10–15 лет характеризовалась переходом от простых к более комплексным интегрированным схемам [1–6]. Исследования последних лет показали, что для наиболее эффективного и экономного использования энергии целесообразно аккумуляция теплоты зданий и сооружений увязывать с источниками энергии для их теплоснабжения. С одной стороны, этому способствовало постоянное улучшение теплофизических свойств зданий, направленных на уменьшение потерь тепла, что снизило расход энергии на поддержание комфортных условий и сделало возможным применение низкотемпературного отопления с температурами не выше 55 °С. С другой стороны – стремление использовать возможности технологии утилизации вторичных энергоресурсов.

Для систем автономного теплоснабжения, условий сельскохозяйственного производства и частного домостроения наиболее перспективны аккумуляторы с твердым аккумуляющим материалом (ТАМ).

Тепловые матрицы с ТАМ имеют простую конструкцию и в силу этого нашли наибольшее распространение. Для перманентного аккумуляции теплоты с практически одновременной его теплоотдачей окружающему воздуху чаще

всего используются аккумуляторы с пористой матрицей. В качестве ТАМ служат наиболее дешевые материалы – гравий, феолит, кремний, остатки строительных материалов. Такие тепловые аккумуляторы проектируются, как правило, с минимальным гидравлическим сопротивлением, что позволяет использовать принцип свободного конвективного переноса.

Рациональное потребление энергетических ресурсов при одновременном обеспечении экологической безопасности окружающей среды в настоящее время является одним из наиболее существенных факторов в снижении себестоимости теплоснабжения, что обуславливает актуальность настоящего исследования.

Авторами предлагается принципиальная конструктивная схема теплового аккумулятора с ТАМ с пористой матрицей, которая приведена на рис. 1.

На объекте автономного теплоснабжения с индивидуальным источником теплоты (теплогенератором) устанавливаются два тепловых аккумулятора 1 в дымовых каналах, отводящих продукты сгорания и выполненных в виде колонн.

На дымоотводящем патрубке котла устанавливается дымосос, производительность которого определяется аэродинамическим сопротивлением аккумулятора с ТАМ.

На каждом из каналов устанавливается автоматический шибер 3 для переключения потока дымовых газов. Аккумуляторы «заряжаются» теплотой попеременно. Пока один из аккумуляторов работает в режиме зарядки, второй работает в режиме разрядки, т. е. остывает, отдавая теплоту в помещения, через которые он проходит.

Время зарядки и разрядки аккумуляторов может быть рассчитано на стадии проектной разработки объекта теплоснабжения на расчетный режим системы отопления по методикам, разработанным авторами.

В аккумуляторе в процессах зарядки и разрядки теплоты происходят сложные теплофизические и массообменные явления, определяемые конструктивными и физическими параметрами системы аккумулятирования теплоты.

Для определения времени зарядки колонны-аккумулятора рекомендуется использовать систему уравнений теплообмена при вынужденной конвекции однородной вязкой несжимаемой жидкости с постоянным коэффициентом вязкости μ и добавлением условий однозначности [3]. Используя эти уравнения, методом численного

моделирования процессов теплообмена в тепловом аккумуляторе с пористой матрицей можно определить время зарядки аккумулятора, которое равно времени полного прогрева колонны-аккумулятора – когда температура на его оси и на поверхности будет одинаковой.

Предложенная авторами методика расчета теплообмена в тепловом аккумуляторе с пористой матрицей в режиме разрядки основывается на закономерностях теории нестационарной теплопроводности [7].

Методика основывается на рассмотрении процесса разрядки колонны-аккумулятора как процесса охлаждения цилиндра конечных размеров в среде с постоянной температурой.

Цилиндр радиусом r_0 отдает теплоту окружающей среде через свою боковую поверхность; коэффициент теплопроводности, теплоемкость и плотность цилиндра (λ , C_p и ρ) не зависят от температуры и считаются известными, заданными; коэффициент теплоотдачи α во всех точках поверхности одинаков и остается постоянным на протяжении всего периода охлаждения. Температура среды (температура внутреннего воздуха в помещении) t_{cp} постоянна.

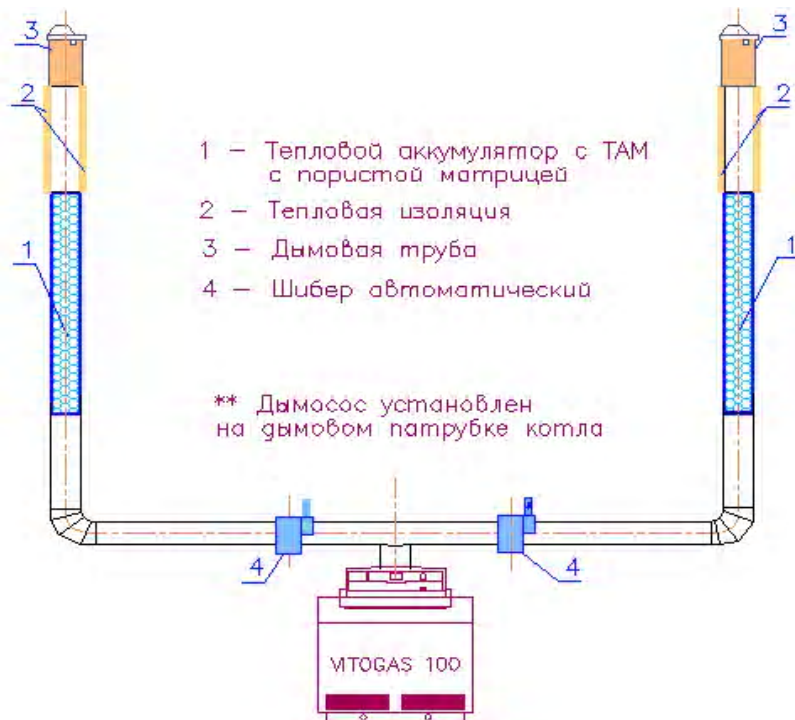


Рисунок 1. Принципиальная конструктивная схема теплового аккумулятора с ТАМ с пористой матрицей.

Теплофизические параметры цилиндра – λ , C_p , ρ (аккумулятора) принимаются как для однородного тела.

В практических расчетах допускается вводить эквивалентный коэффициент теплопроводности и усредненные по массе газов и аккумулирующего материала значения изобарной теплоемкости и плотности [7, 8].

Разработанная методика позволяет определить температуру на оси и на поверхности теплового аккумулятора в любой заданный момент времени τ_1 , а также количество теплоты, выделившееся за промежуток времени от $\tau=0$ до τ_1 , т. е. за период его разрядки.

Теория нестационарной теплопроводности рассматривает температуру в любой точке цилиндра при его охлаждении как избыточную температуру над температурой окружающей среды.

При этих условиях уравнение теплопроводности для цилиндра:

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

Начальные условия: при $\tau=0$ $\vartheta = \vartheta_1$.

Граничные условия: при $\tau > 0$ и

$$R = 0; \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial r} \right)_{r=0} = 0;$$

$$R = 1; \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial r} \right)_{r=r_0} = -\frac{\alpha}{\lambda} \vartheta_{r=r_0}.$$

Задачу, сформулированную уравнением (1) и условиями однозначности решают методом разделения переменных и в результате математических преобразований получают решение в виде:

$$\frac{\vartheta_{cm}}{\vartheta_1} = \frac{t_{cm} - t_{cp}}{t_0 - t_{cp}} = f_1 \left[\left(\frac{\alpha \cdot r}{\lambda_{cm}} \right); \left(\frac{a \cdot \tau}{r^2} \right) \right] = f_1(Bi; Fo); \quad (2)$$

$$\frac{\vartheta_u}{\vartheta_1} = \frac{t_u - t_{cp}}{t_0 - t_{cp}} = f_2 \left[\left(\frac{\alpha \cdot r}{\lambda_{cm}} \right); \left(\frac{a \cdot \tau}{r^2} \right) \right] = f_2(Bi; Fo); \quad (3)$$

$$\frac{\vartheta_{cm}}{\vartheta_1} = \Theta_{r=r_0} \text{ и } \frac{\vartheta_u}{\vartheta_1} = \Theta_{r=0} \text{ определяют по таблицам или номограммам.}$$

Где a – коэффициент температуропроводности,

$$a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \left[\frac{M^2}{c} \right];$$

$Fo = \frac{a \tau}{r^2}$ – число Фурье – «безразмерное время»;

$Bi = \frac{\alpha \cdot r}{\lambda_{cm}}$ – критерий Био;

$\vartheta_{ct} = t_{ct} - t_{cp}$, – текущая избыточная температура стенки пластины по сравнению с температурой среды, °С;

$\vartheta_u = t_u - t_{cp}$, – текущая избыточная температура центра пластины по сравнению с температурой среды, °С;

Или для регулярного теплового режима, когда число Фурье $Fo \geq 0,25$, безразмерные температуры на оси и поверхности цилиндра вычисляются по формулам [7]:

$$\Theta_{r=0} = f_1(Bi) \exp[\mu_1^2 \cdot Fo]; \quad (4)$$

$$\Theta_{r=r_0} = f_2(Bi) \exp[\mu_1^2 \cdot Fo]. \quad (5)$$

Алгоритм предложенной методики определения количества отданной теплоты за период разрядки и времени остывания аккумулятора приведен на рисунке 2.

Оценка экономической эффективности разработанного теплового аккумулятора с ТАМ с пористой матрицей проведена для частного дома в четырёх уровнях с использованием указанной методики.

Источник теплоты для автономной системы теплоснабжения – котел Vitogas 100, устанавливается на цокольном этаже здания. Присоединение дымоходов и тепловых аккумуляторов к котлу приведено на плане цокольного этажа на рисунке 3. Расположение колонн-аккумуляторов в помещениях показано на разрезе здания на рисунке 4.

Vitogas 100 – низкотемпературный водогрейный котел для газообразного топлива с программируемой и погодозависимой теплогенерацией с переменной температурой теплоносителя и полной автоматизацией всех процессов.

Vitogas 100 укомплектован атмосферной горелкой предварительного смешения. Принятый в проекте теплогенератор отмечен знаком экологической чистоты «Голубой ангел», что исключит возможность загрязнения теплового аккумулятора. Нормативный к.п.д котла с учетом среднегодового температурного цикла (включая летний режим эксплуатации для горячего водоснабжения) составляет 92 %.

По результатам расчетов внедрение предлагаемого теплового аккумулятора для рассматриваемого частного дома позволит получить эко-

Конструктивные данные для расчета

- геометрические размеры и материал колонны-аккумулятора;
- твердый аккумулирующий материал, тип и размеры;
- высота заполнения твердым аккумулирующим материалом;
- источник теплоты для аккумулятора с ТАМ;
- греющий теплоноситель, его состав и температура.

Краевые условия (условия однозначности)

- ⇒ начальные условия – задается распределение температур в теле колонны-аккумулятора и температура окружающей среды в начальный момент времени;
- ⇒ физические условия – эффективные теплофизические параметры колонны-аккумулятора: λ , C_p , ρ ;
- ⇒ геометрические размеры – задаются в конструктивных данных;
- ⇒ граничные условия формулируют в виде граничных условий III рода, при постоянной температуре окружающей среды и одинаковом коэффициенте теплоотдачи по всей поверхности рассматриваемого тела $\alpha = 9 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$.

Изменение внутренней энергии колонны-аккумулятора за период ее полного охлаждения

$$Q_0 = \pi \cdot r_0^2 \cdot l \cdot c_p \cdot \rho \cdot (t_0 - t_{cp}).$$

Средняя безразмерная температура колонны-аккумулятора $\bar{\Theta}_1$ в момент времени τ_1 определится как произведение средних безразмерных температур для безграничного цилиндра радиусом r_0 , м и пластины толщиной $2\delta_z$, м:

$$\bar{\Theta}_1 = \bar{\Theta}_r \cdot \bar{\Theta}_z$$
Средняя безразмерная температура для цилиндра:

$$\bar{\Theta}_r = \frac{4 B i^2}{\mu_1^2 \cdot (\mu_1^2 + B i^2)} \cdot \exp(-\mu_1^2 \cdot F o).$$

Средняя безразмерная температура для пластины:

$$\bar{\Theta}_z = \frac{2 \sin^2 \mu_1}{\mu_1^2 + \mu_1 \cdot \sin \mu_1 \cdot \cos \mu_1} \exp(-\mu_1^2 \cdot F o).$$

Количество теплоты Q_0 , Дж, которое отдается поверхностью колонны-аккумулятора за время от $\tau = 0$ до τ_1 :

$$Q = Q_0 \cdot (1 - \bar{\Theta}_1).$$

Рисунок 2. Алгоритм методики определения количества отданной теплоты за период разрядки аккумулятора.

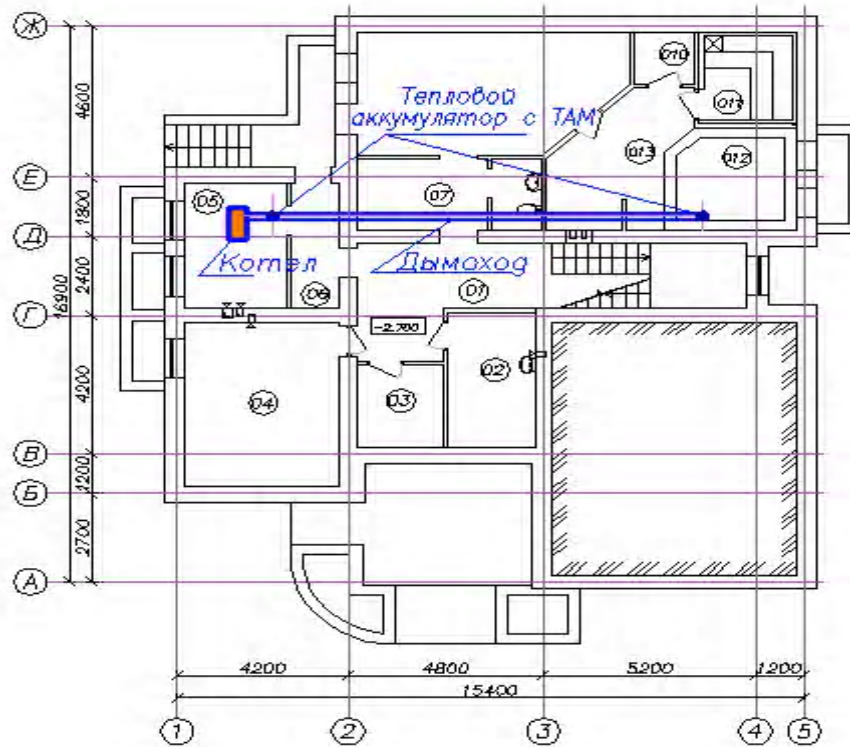


Рисунок 3. Присоединение дымоходов и тепловых аккумуляторов к котлу.

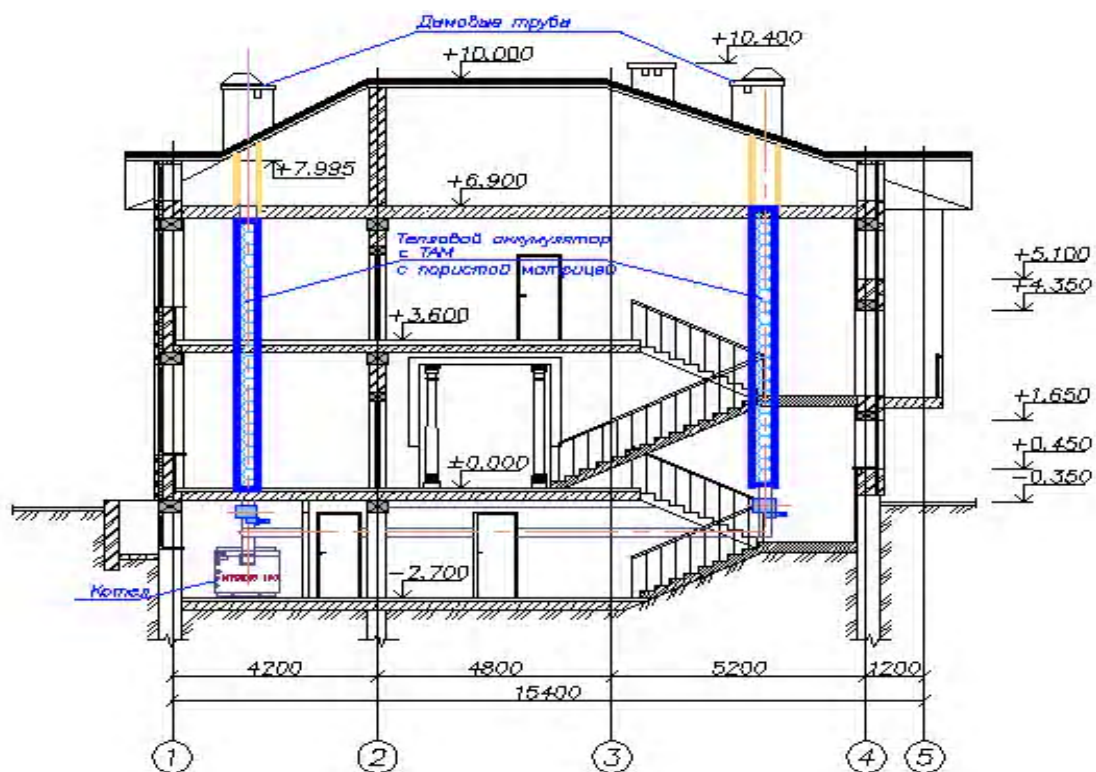


Рисунок 4. Расположение колонн-аккумуляторов в помещениях здания.

номии природного газа не менее 15 % от годового расхода на отопление этого объекта, поскольку в ходе проведенной оценки экономической

эффективности не учтена теплота, отдаваемая в помещения здания тепловым аккумулятором в период его зарядки.

Литература

1. Бут, Д. А. Накопители энергии / Д. А. Бут, Б. Л. Алиевский, С. Р. Мизгорин., П. В. Васюкевич. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 398 с.
2. Лидоренко, Н. С. Электрохимические генераторы / Н. С. Лидоренко, Г. Ф. Мучник. – М. : Энергоиздат, 1982. – 433 с.
3. Ададунов, Е. А. Повышение эффективности использования аккумуляторов теплоты с возобновляемыми источниками энергии : дис. ... канд. техн. наук: 05.12.08 / Е. А. Ададунов. – Краснодар, 2004. – 178 с.
4. Солнечные коллекторы, совмещенные с аккумуляторами теплоты / Р. А. Амерханов, К. А. Гарькавый, М. Е. Ярошенко, Е. А. Ададунов, А. И. Чернышев, П. А. Чистяков // Известия академии промышленной экологии. 2002. № 4. С. 47–49.
5. Методы теплового расчета подземных тепловых котлов / А. Н. Щербань и др. // Процессы теплообмена в искусственных циркуляционных системах извлечения теплоты Земли. – Л. : ЛГИ, 1978. – С. 45–70.
6. Амерханов, Р. А. Аккумуляция теплоты в системах теплоснабжения сельского хозяйства / Р. А. Амерханов, А. А. Долинский, Т. В. Морозюк // Промышленная теплотехника. 2002. Т. 24. № 1. С. 106–108.
7. Исаченко, В. П. Теплопередача : учебник для вузов / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М. : Высшая школа, 1988.
8. Брюханов, О. Н. Тепломассообмен / О. Н. Брюханов, С. Н. Шевченко. – М. : ИНФРА-М, 2013. – 464 с.
9. Abediyi, G. A. An appraisal of one-dimensional analytical models for the packed bed thermal storage systems utilizing sensible heat storage materials / G. A. Abediyi, D. J. Chenevert // ASME. Journal of Energy Resources Technology. 1996. Vol. 118. №1. P. 44–49.
10. Svec, O. J. Performance of spiral ground heat exchanger for heat pump application / O. J. Svec, H. L. Palmer // International Journal of Energy Research. 1989. Vol. 13. P. 503–510.
11. Rabin, Y. An efficient numerical solution for the multidimensional solidification problem using a microcomputer / Y. Rabin, E. Korin // International Journal Heat and Mass Transfer. 1993. Vol. 36. № 3. P. 673–683.
12. Rabin, Y. Thermal analysis of a helical heat exchange for long-term thermal energy storage in the ground / Y. Rabin, E. Korin // International Journal Heat and Mass Transfer. 1996. Vol. 39. № 5. P. 1051–1065.

Reference

1. Booth, D. A.; Alievsky, B. L.; Mizgorin, S. R.; Vasyukevich, P. V. Energy Storage. Moscow: Energoatomizdat, 1991. 398 p.
2. Lidorenko, N. C.; Muchnik, G. F. Electrochemical generators. Moscow: Energoizdat, 1982. 433 p.
3. Adadurov, E. A. Increase of efficiency of use of heat accumulators with renewable energy sources: Ph.D. thesis in Engineering: 05.12.08. Krasnodar, 2004. 178 p.
4. Amerkhanov, R. A.; Gar'kaviy, K. A.; Yaroshenko, M. E.; Adadurov, E. A.; Chernyshev, A. I.; Chistyakov, P. A. Solar panels combined with batteries for heat. In: *News of Academy of industrial ecology*, 2002, No. 4, pp. 47–49.
5. Shcherban, A. N. et al. Methods of thermal calculation of underground thermal boilers. In: *Heat transfer processes in artificial circulation systems for extracting the Earth's heat*, Leningrad: LGI, 1978, pp. 45–70.
6. Amerkhanov, R. A.; Dolinsky, A. A.; Morozuk, T. V. Accumulation of heat in heating systems of agriculture. In: *Industrial heat engineering*, 2002, Vol. 24, No. 1, pp. 106–108.
7. Isachenko, V. P.; Osipova, V. A.; Sukomel, A. S. Heat transfer : textbook for universities. Moscow: Vishchaya shkola, 1988.
8. Bryukhanov, O. N.; Shevchenko, S. N. Heat and mass transfer. Moscow: INFRA-M, 2013. 464 p.
9. Abediyi, G. A.; Chenevert, D. J. An appraisal of one-dimensional analytical models for the packed bed thermal storage systems utilizing sensible heat storage materials. In: *ASME. Journal of Energy Resources Technology*, 1996, Vol. 118, No. 1, pp. 44–49.
10. Svec, O. J.; Palmer, H. L. Performance of spiral ground heat exchanger for heat pump application. In: *International Journal of Energy Research*, 1989, Vol. 13, pp. 503–510.
11. Rabin, Y.; Korin, E. An efficient numerical solution for the multidimensional solidification problem using a microcomputer. In: *International Journal Heat and Mass Transfer*, 1993, Vol. 36, No. 3, pp. 673–683.
12. Rabin, Y.; Korin, E. Thermal analysis of a helical heat exchange for long-term thermal energy storage in the ground. In: *International Journal Heat and Mass Transfer*, 1996, Vol. 39, No. 5, pp. 1051–1065.
13. Rabin, Y.; Korin, E. Incorporation of phase-change materials into a ground thermal energy storage system: Theoretical study. In: *Trans. of the ASME. Journal of Energy Resources Technology*, 1996, Vol. 118, No. 3, pp. 237–241.
14. Metz, P. The use of serpentine earth coils in ground coupled storage. In: *Journal of Solar engineering, Transactions of ASME*, 1990, Vol. 106.

13. Rabin, Y. Incorporation of phase-change materials into a ground thermal energy storage system: Theoretical study / Y. Rabin, E. Korin // *Trans. of the ASME. Journal of Energy Resources Technology*. 1996. Vol. 118. № 3. P. 237–241.
14. Metz, P. The use of serpentine earth coils in ground coupled storage / P. Metz // *Journal of Solar engineering, Transactions of ASME*, 1990. Vol. 106.
15. Cao, Y. A study of thermal energy storage systems with conjugate turbulent forced convection / Y. Cao, A. Faghri // *Journal of Heat Transfer*. 1992. Vol. 114, 11. P. 1019–1027.

Монах Светлана Игоревна – кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергоресурсосбережение в системах теплоснабжения и вентиляции.

Афанасьев Алексей Анатольевич – магистрант кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергоресурсосбережение в системах теплоснабжения и вентиляции.

Андрушкина Лилия Петровна – магистрант кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергоресурсосбережение в системах теплоснабжения и вентиляции.

Шапошник Евгений Николаевич – магистрант кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергоресурсосбережение в системах теплоснабжения и вентиляции.

Монах Світлана Ігорівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплотехніки, теплогазопостачання і вентиляції ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергоресурсозбереження в системах теплопостачання та вентиляції.

Афанасьєв Олексій Анатолійович – магістрант кафедри теплотехніки, теплогазопостачання і вентиляції ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергоресурсозбереження в системах теплопостачання та вентиляції.

Андрушкіна Лілія Петрівна – магістрант кафедри теплотехніки, теплогазопостачання і вентиляції ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергоресурсозбереження в системах теплопостачання та вентиляції.

Шапошник Євген Миколайович – магістрант кафедри теплотехніки, теплогазопостачання і вентиляції ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергоресурсозбереження в системах теплопостачання та вентиляції.

Monah Svetlana – Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Thermal engineering, heat gas supply and ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: storage of energy and resources in the systems of heat supply and ventilation.

Afanasev Aleksey – Master's student, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: storage of energy and resources in the systems of heat supply and ventilation.

Andrushkina Liliya – Master's student, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: storage of energy and resources in the systems of heat supply and ventilation.

Shaposhnik Evgeniy – Master's student, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: storage of energy and resources in the systems of heat supply and ventilation.