

УДК 697.1:536.2

## **ГЕЛИОСИСТЕМА ОТОПЛЕНИЯ С ДВУХФАЗНОЙ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ЖИДКОСТЬЮ**

**Л. Л. ВАСИЛЬЕВ<sup>1</sup>, Д. Х. ХАРЛАМПИДИ<sup>2</sup>, В. А. ТАРАСОВА<sup>2</sup>,  
А. С. ЖУРАВЛЕВ<sup>1</sup>, М. А. КУЗНЕЦОВ<sup>2</sup>, Л. П. ГРАКОВИЧ<sup>1</sup>,  
М. И. РАБЕЦКИЙ<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Государственное научное учреждение «Институт  
тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной  
академии наук Беларуси», г. Минск*

<sup>2</sup>*Институт проблем машиностроения  
имени А. Н. Подгорного Национальной академии наук  
Украины, г. Харьков*

**Ключевые слова:** альтернативная энергетика, гелиосистема, солнечный коллектор, термодинамический насос, тепловая труба.

### **Введение**

В последнее десятилетие происходят значительные изменения в энергетике, жилищно-коммунальном хозяйстве, сельском хозяйстве, пищевой промышленности, архитектуре и строительстве. Основными мировыми тенденциями являются существенное сокращение потребления тепловой энергии от источников на углеводородном топливе и снижение ее потерь при транспортировке от генерирующих мощностей к потребителям. Большие перемены имеют место, в частности, в секторе теплоснабжения, горячего водоснабжения, кондиционирования помещений. Традиционные источники топлива и энергии активно вытесняются возобновляемыми, одним из которых является солнечное излучение, все шире используемое для производства электричества с помощью фотоэлектрических преобразователей либо в целях получения тепла для отопления помещений и систем горячего водоснабжения [1]–[6]. На достижение прогресса в области гелиотехники, совершенствование имеющихся и создание новых конструкций направлены научные исследования, поиски инженерных решений. Важно отметить, что развитие альтернативных технологий в энергетике благотворно влияет на экологию, позволяя снизить количество выбросов вредных веществ в атмосферу.

Эффективность гелиосистемы для отопления помещений и нужд горячего водоснабжения в значительной степени определяется техническими возможностями солнечного коллектора и контура циркуляции. Высокие характеристики оборудования могут быть обеспечены применением естественно-циркуляционных систем с двухфазной многокомпонентной жидкостью, работающих по принципу термодинамического насоса и сорбирующих тепло солнечного излучения коллекторами на базе тепловых труб либо термосифонов.

Целью работы является повышение эффективности энергосберегающих систем получения тепла и холода, использующих солнечную энергию, усовершенствование контура циркуляции теплоносителя путем организации его работы по принципу термодинамического насоса.

### **Гелиосистемы с коллекторами на базе тепловых труб**

Одним из способов использования солнечной энергии является подогрев воды для систем горячего водоснабжения, а также отопления при пониженных температурах и получения холода с целью обеспечения комфортных условий в помещениях летом.

Простая водонагревательная установка состоит из коллектора солнечной энергии, бака-аккумулятора, дополнительного нагревателя воды и насоса. Для тепло- и хладоснабжения предназначены более сложные комбинированные системы [7], состав которых дополняется сорбционной холодильной установкой, также использующие энергию солнечного излучения (рис. 1). Получаемый холод может быть предназначен для кондиционирования помещений в дневное время.

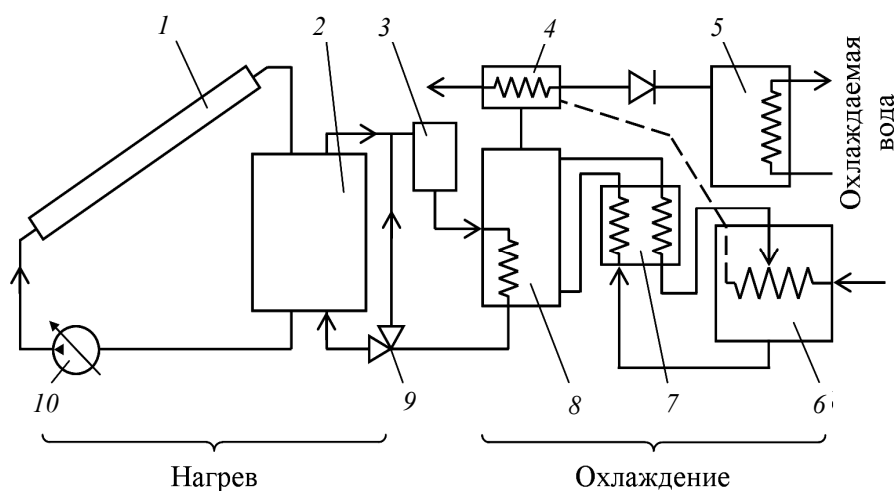


Рис. 1. Схема комбинированной солнечной установки для тепло- и хладоснабжения: 1 – солнечный коллектор; 2 – бак-аккумулятор; 3 – дополнительный источник тепла; 4 – конденсатор; 5 – испаритель; 6 – абсорбер; 7 – теплообменник; 8 – генератор; 9 – вентиль; 10 – жидкостный насос

Основным элементом гелиоустановки является солнечный коллектор, конструкция которого в значительной степени определяет эффективность и стоимость всей системы. Плоский коллектор (рис. 2) позволяет использовать прямую и рассеянную солнечную радиацию без необходимости слежения за Солнцем. Конвективные коллекторы, передача тепла в которых производится жидкостью при ее вынужденном течении, достаточно эффективны, технологичны и не дороги, однако обладают недостатками: реверсивность теплообмена при отсутствии солнечного излучения, сложность дренажа системы. В качестве теплоприемных и теплопередающих элементов солнечных коллекторов могут применяться автономные замкнутые двухфазные устройства для передачи тепла – тепловые трубы, обеспечивающие равномерность температуры по длине приемного элемента и снижение тепловых потерь. При этом повышается надежность коллектора, предотвращается сброс тепла из системы при отсутствии солнечного излучения вследствие однонаправленности теплопередачи наклонных тепловых труб, работающих в поле гравитации. К недостаткам коллекторов с тепловыми трубами можно отнести их более высокую стоимость.

При выполнении теоретического расчета системы солнечного отопления определяется количество тепла, которое может выработать солнечный коллектор с тепловыми трубами или термосифонами, и вычисляется необходимая мощность дополнительного источника тепла. Уровень солнечной радиации, падающей на единицу площади коллектора, рассчитывается методом Ангстрема. Суть его состоит в том, что, располагая данными о продолжительности солнечного периода, полученными на основе многолетних наблюдений на метеорологических станциях, можно рассчитать среднемесячные уровни солнечной радиации, а затем ее суммарную величину, поступающую на коллектор, с учетом местной широты, склонения Солнца, угла наклона коллектора, используя уравнение Ангстрема–Прескотта [8]–[10]:

$$\frac{H}{H_0} = a + b \frac{\bar{n}}{n_0},$$

где  $H$  – суммарная среднемесячная солнечная радиация, поступающая на поверхность Земли;  $H_0$  – радиация, поступающая на верхнюю границу атмосферы;  $\bar{n}$ ,  $n_0$  – среднемесячная и максимально возможная месячная продолжительности солнечного сияния;  $a$  и  $b$  – эмпирические коэффициенты, которые учитывают расположение местности, суммарную солнечную радиацию и определяются методом регрессии для разных климатических зон [11].

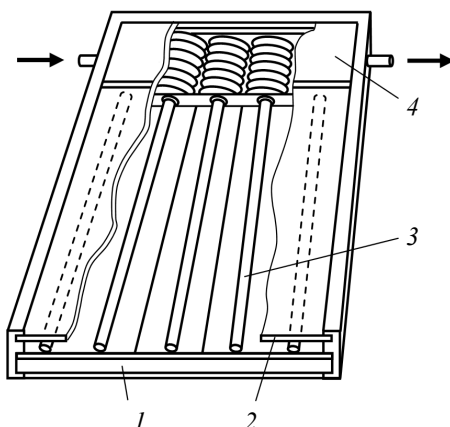


Рис. 2. Плоский коллектор солнечной энергии с тепловыми трубами: 1 – теплоизоляция; 2 – стеклянное покрытие; 3 – тепловые трубы; 4 – жидкостный теплообменник

Полезное количество тепла, производимое солнечным коллектором с селективной поверхностью, в который вмонтированы вакуумные изоляторы и тепловые трубы, может быть найдено из следующего уравнения [12]:

$$Q = F_R A_s \left[ S - \frac{A_r}{A_s} U_L (T_r - T_a) \right],$$

где  $F_R$  – коэффициент отвода тепла;  $S$  – энергия солнечного излучения, поглощенная единицей площади приемника;  $A_r$  – площадь абсорбционной поверхности коллектора;  $A_s$  – общая площадь коллектора;  $U_L$  – коэффициент теплопередачи;  $T_r$  – внутренняя температура коллектора;  $T_a$  – температура окружающей среды.

Накопленный в Институте тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси многолетний опыт разработки и исследования тепловых труб разнообразных конструкций, работоспособных в различных диапазонах температур и внешних условий, термосифонов (конвективных, пародинамических, кольцевых), в том числе для использования возобновляемых источников энергии, а также солнечных коллекторов на их основе [7, ] [13]–[16], данные других авторов [17]–[19] свидетельствуют о высоком уровне теплотехнических параметров таких устройств. Анализ влияния на эффективность  $\eta = q_{\text{вых}} / q_{\text{солн}}$  ( $q_{\text{вых}}$  – удельная полезная энергия, используемая на нагрев теплоносителя;  $q_{\text{солн}}$  – удельная энергия падающего солнечного излучения) солнечного коллектора термических сопротивлений  $\tilde{R}$  входящих в его состав компонентов показал, что зависимость  $\eta(\tilde{R})$  не линейна, при уменьшении термического сопротивления до некоторого характерного значения эффективность  $\eta$  практически не зависит от  $\tilde{R}$ .

В результате натурных испытаний установлено, что коллекторы такого типа обладают следующими достоинствами:

- поддерживается равномерность температуры по всей длине теплоприемного элемента, что снижает потери тепла;
- обеспечивается высокая надежность устройства, поскольку при выходе из строя отдельных элементов передача энергии уменьшается, но не прекращается;
- предотвращается сброс тепла из системы при недостатке солнечного излучения из-за отсутствия теплопередачи наклонными тепловыми трубами против сил гравитации;
- осуществляется быстрый запуск системы ввиду низкой теплоемкости конструкции.

Такие свойства коллекторов обеспечивают возможность успешного их применения для создания эффективных гелиосистем получения тепла и холода.

#### **Естественно-циркуляционная система отопления с двухфазной многокомпонентной жидкостью**

Важным звеном, обеспечивающим эффективность передачи полученной в гелиоколлекторе энергии потребителю, является контур циркуляции теплоносителя.

Существующие способы циркуляции теплоносителя в системах отопления, такие как применение насосов или осуществление движения горячей воды через отопительные приборы за счет движущего напора циркуляции, обусловленного разностью плотностей нагретой и охлажденной воды в опускных и подъемных трубах, имеют свои недостатки. Так, с одной стороны, естественно-циркуляционные системы с однородным теплоносителем обладают неоправданно высокой металлоемкостью, а с другой – работа систем с принудительной циркуляцией теплоносителя связана с затратами энергии на привод насосов. Зачастую работа насосов сопровождается шумом и вибрациями. Кроме того, насос является источником аварий и требует систематического надзора.

Работы по созданию принципиально новых методов обеспечения интенсивной циркуляции теплоносителя в системах охлаждения устройств промышленной теплоэнергетики велись в 80-х гг. прошлого столетия в Харьковском инженерно-строительном институте исследовательской группой, возглавляемой Е. М. Новохатским [20]. Разработанные ими экспериментальные образцы естественно-циркуляционных систем обладали многими преимуществами. Интенсификация движения теплоносителя осуществлялась в них за счет термодинамической работы цикла Ренкина (Rankine cycle), которая производилась в результате испарения и конденсации какой-либо жидкости с температурой кипения меньшей, чем температура кипения основного теплоносителя. Такая система получила название «система с термодинамическим насосом». С тех пор принципиально новый способ организации движения теплоносителя, основанный на использовании работы расширения легкокипящей вспомогательной жидкости, был незаслуженно забыт. Однако исследование таких систем не потеряло свою актуальность, а, наоборот, с повсеместным внедрением «зеленой» энергетики для них открылись новые области применения. Так, естественно-циркуляционная система может быть применена в комплексе с гелиоколлекторами на основе тепловых труб в системах отопления и горячего водоснабжения. Работающая без подвода внешних источников первичной энергии (электроэнергии) по принципу термодинамического насоса, образованного двухфазной многокомпонентной жидкостью, система имеет повышенную надежность движения теплоносителя, экономичность работы, низкую металлоемкость, простоту конструкции. В таких системах происходит существенное увеличение движущего напора циркуляции за счет использования работы расширения испаряющейся в

подъемной части циркуляционного контура легкокипящей жидкости и конденсации ее паров во вспомогательном теплообменнике.

Система отопления и горячего водоснабжения включает в себя несколько контуров (рис. 3). В гелиоконтуре осуществляется насосная циркуляция воды. При этом предусмотрен сброс части нагретой воды в бак-аккумулятор 15 для обеспечения горячего водоснабжения.

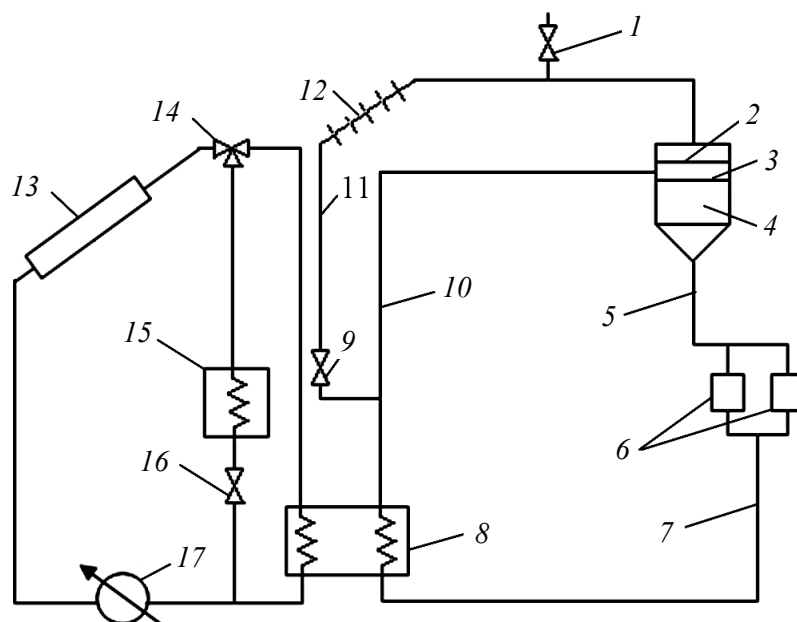


Рис. 3. Конструкция термосифонной гелиосистемы с термодинамическим насосом:

1 – вентиль; 2 – уровень вспомогательной жидкости в циклоне; 3 – уровень воды в циклоне; 4 – циклон; 5 – опускная труба; 6 – отопительные приборы; 7 – обратная труба; 8 – теплообменник; 9 – игольчатый вентиль; 10 – подъемная труба; 11 – труба для вспомогательного теплоносителя; 12 – конденсатор пара легкокипящей жидкости; 13 – солнечный коллектор; 14 – трехходовой вентиль; 15 – бак-аккумулятор; 16 – вентиль; 17 – насос

Отвод теплоты из гелиоконтура и подвод ее к основному теплоносителю (воде) естественно-циркуляционной системы отопления осуществляется через теплообменник рекуперативного типа 8. Система отопления заполнена водой так, что уровень воды 3 в циклоне 4 может располагаться несколько выше или ниже ввода в циклон пароводяной смеси, поднимающейся вверх по подъемной трубе 10. Помимо воды в данной системе имеется вспомогательная легкокипящая жидкость (например, бензол) или гетерогенная легкокипящая жидкость – бензин, у которого температура кипения первых фракций находится в пределах 40–50 °С, а последних – около 80–85 °С. Уровень этой вспомогательной жидкости 2 в циклоне 4 расположен выше уровня 3, так как ее плотность меньше плотности воды. Вспомогательная жидкость заливается в систему через вентиль 1, так что конденсатор пара легкокипящей жидкости 12 и труба 11, соединенная с подъемной трубой 10, также заполнены легкокипящей жидкостью. До начала пуска системы отопления в работу вентиль 9 закрыт. Циклон 4 соединен с отопительными приборами 6 опускной трубой 5. Охлажденная в отопительных приборах вода по обратной трубе 7 поступает в теплообменник 8. Начальный период работы такой отопительной системы ничем не отличается от этого периода работы обычной отопительной системы с естественной циркуляцией теплоносителя. После того как температура воды в подъемной трубе достигает величины,

превышающей температуру кипения самых легких фракций вспомогательной жидкости, вентиль 9 открывают, легкокипящая жидкость самотеком поступает в подъемную трубу 10, полностью или частично испаряется и пароводяная смесь поступает в циклон 4, где происходит разделение пара и жидкости. Горячая вода из циклона направляется в отопительные приборы 6. Отделившиеся от воды пары легкокипящей жидкости поступают в конденсатор 12, а затем конденсат самотеком поступает в нижнюю часть подъемной трубы. Конденсатор представляет собой оребренную трубу, которая омывается холодным воздухом.

Если легкокипящая жидкость гомогенна, то она участвует в процессе циркуляции теплоносителя, если гетерогенна – в процесс циркуляции с повышением температуры вступают фракции с более высокой температурой кипения, и, таким образом, количество вспомогательной жидкости, участвующей в процессе циркуляции, растет с повышением температуры теплоносителя до тех пор, пока не будет участвовать фракция с самой высокой температурой кипения.

Предлагаемая технология создания гелиосистемы отопления с двухфазной многокомпонентной жидкостью также позволяет реализовать новые перспективные способы интенсификации теплообмена, основанные на использовании наносред.

Гелиотехнологии могут быть успешно применены в сушильных установках аграрного сектора, системах нагрева воды для бытовых целей, обеспечивая экономию до 5 тыс. тонн условного топлива в год [21] при существенном улучшении экологической обстановки.

Задачи по использованию энергии Солнца, наряду с другими возобновляемыми источниками энергии, актуальны для Республики Беларусь и соответствуют приоритетным направлениям научно-технической деятельности на 2016–2020 гг.

### **Заключение**

В результате обобщения изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Развитие солнечной и других видов альтернативной энергетики является важной и актуальной задачей, направленной на решение экономических и экологических проблем.

2. Коллекторы на тепловых трубах и термосифонах обладают рядом достоинств, позволяющих создавать эффективные гелиосистемы для тепло- и хладоснабжения потребителей.

3. Высокой эффективностью использования солнечной энергии обладает естественно-циркуляционная система обогрева объектов, работающая по принципу термодинамического насоса, образованного двухфазной многокомпонентной жидкостью. Технология создания такой гелиосистемы отопления позволяет реализовать новые перспективные способы интенсификации теплообмена, основанные на использовании наносред.

### **Литература**

1. Покотилов, В. В. Использование гелиосистем и других ВИЭ для теплоснабжения многоэтажных зданий / В. В. Покотилов, М. А. Рудковский // Энергоэффективность. – 2014. – № 1. – С. 16–20.
2. Анарбаев, А. И. Сопоставление эксплуатационных характеристик некоторых типов солнечных коллекторов и водонагревательных установок в условиях Узбекистана / А. И. Анарбаев, Р. А. Захидов, Н. И. Орлова // Гелиотехника. – 2007. – № 1. – С. 14–20.

3. Jee, J. M. Flat plate solar photovoltaic–thermal (PV/T) systems: A reference guide / J. M. Jee, S. Iniyar, G. Ranko // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – Vol. 51. – P. 62–88.
4. Мырзакулов, Б. К. Энергосбережение и возобновляемые источники энергии / Б. К. Мырзакулов // *Наука, новые технологии и инновации*. – 2013. – № 7. – С. 18–24.
5. Del Chiaro, B. Solar Water Heating: How California Can Reduce Its Dependence on Natural Gas / B. Del Chiaro, T. Telleen-Lawton. – Los Angeles: Environment California Research & Policy Center, 2007. – 20 p.
6. Савилов, А. В. Альтернативные источники солнечной энергии в многоквартирном доме / А. В. Савилов, А. А. Петрушкин // *Молодой ученый*. – 2017. – № 10. – С. 80–85.
7. Васильев, Л. Л. Тепловые трубы в системах с возобновляемыми источниками энергии / Л. Л. Васильев, Л. П. Гракович, Д. К. Хрусталева. – Минск: Наука и техника, 1988. – 159 с.
8. Gueymard, C. A critical look at recent interpretations of the Ångström approach and its future in global solar radiation prediction / C. Gueymard, P. Jindra, V. Estrada-Cajigal // *Solar Energy*. – 1995. – Vol. 54, No 5. – P. 357–363.
9. Wong, T. Solar radiation model / T. Wong, W. K. Chow // *Applied Energy*. – 2001. – Vol. 69. – P. 191–224.
10. Пашинский, В. А. Оценка падающей солнечной радиации на горизонтальную поверхность территории в условиях Республики Беларусь / В. А. Пашинский, А. А. Бутько, А. А. Черкасова // *Экол. вестн.* – 2015. – Т. 32, № 2. – С. 77–82.
11. Radosavljević, J. Defining of the intensity of solar radiation on horizontal and oblique surfaces on Earth / J. Radosavljević, A. Đorđević // *Facta Universitatis. Ser.: Working and Living Environmental Protection*. – 2001. – Vol. 2, No 1. – P. 77–86.
12. Duffie, J. A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4th edition / J. A. Duffie, W. A. Beckman. – Hoboken, New Jersey (USA): Wiley, 2013. – 936 p.
13. Анализ параметров плоского солнечного коллектора с тепловыми трубами / Л. Л. Васильев [и др.] // *Вестні АН БССР. Сер. фіз.-энергет. навук*. – 1984. – № 3. – С. 57–62.
14. Использование теплообменников на тепловых трубах для кондиционирования, в области пищевой промышленности и холодильной техники / Л. Л. Васильев [и др.] // *Вестні НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук*. – 2014. – № 3. – С. 85–90.
15. Использование возобновляемых источников энергии и вторичных энергоресурсов с помощью тепловых труб / Л. Л. Васильев [и др.] // *Энергоэффективность*. – 2016. – № 11. – С. 28–31.
16. Васильев, Л. Л. Утилизация возобновляемых и вторичных энергоресурсов с помощью тепловых труб и термосифонов / Л. Л. Васильев, А. С. Журавлев // *Энергетика и ТЭК*. – 2017. – Т. 167, № 2. – С. 20–22.
17. Rassamakin, B. Aluminum heat pipes applied in solar collectors / B. Rassamakin [et al.] // *Solar Energy*. – 2013. – Vol. 94. – P. 145–154.
18. Azad, E. Theoretical and experimental investigation of heat pipe solar collector / E. Azad // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2008. – Vol. 32, Iss. 8. – P. 1666–1672.

19. Riffat, S. B. A novel hybrid heat pipe solar collector/CHP system / S. B. Riffat, X. Zhao // J. Renew. Energy. – 2004. – Vol. 29. – P. 2217–2233.
20. Новохатский, Е. М. Отопительная система с термодинамическим насосом / Е. М. Новохатский, А. Д. Харлампиди. – Харьков : ХИСИ, 1984. – 5 с. – Деп. в ВНИИИС № 5054–84.
21. Нистюк, В. П. Роль возобновляемой энергетики в Республике Беларусь и перспективы ее развития / В. П. Нистюк // Энергоэффективность. – 2010. – № 3. – С. 17–20.

*Получено 27.11.2018 г.*