

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ В СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРАХ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

B.M. RASSAMAKIN, S.M. KHAIIRNASOV, V.K. ZARIPOV

PROSPECTS OF ALUMINIUM HEAT PIPES APPLICATION TO SOLAR COLLECTOR OF WATER HEATING SYSTEMS

Анотація. В статті наведені результати розробки алюмінієвих теплових труб та їх випробувань, а також опис дослідних зразків плоского і вакуумного сонячних колекторів і результати їх випробувань. Експериментальні дослідження показали, що нові легкі та недорогі теплові труби мають високі теплопередаючі характеристики. Максимальна теплопередаюча спроможність одної теплової труби не менш ніж 210 Вт, а її термічний опір - від 0,02 до 0,07 С°/Вт. Гідравлічний опір теплообмінника сонячного колектора може бути знижено нижче за 100 Па, а їх ККД достатньо висок до 0,72. Проведені дослідження показали перспективність використання алюмінієвих профільних теплових труб в сонячних колекторах водонагрівальних установок.

Ключові слова: тепла труба, сонячний колектор, теплообмінник.

Аннотация. В статье приводятся результаты разработки алюминиевых тепловых труб и их испытаний, а также описания опытных образцов плоского и вакуумного солнечных коллекторов и результаты их испытаний. Экспериментальные исследования показали, что новые легкие и недорогие тепловые трубы имеют высокие теплопередающие характеристики. Максимальная теплопередающая способность одной тепловой трубы не менее 210 Вт, а ее термическое сопротивление - от 0,02 до 0,07 С°/Вт. Гидравлическое сопротивление теплообменника солнечного коллектора может быть снижено ниже, чем 100 Па, а их КПД достаточно высок до 0,72. Проведенные исследования показали перспективность применения алюминиевых профильных тепловых труб в солнечных коллекторах водонагревательных установок.

Ключевые слова: тепловая труба, солнечный коллектор, теплообменник.

Annotation. Results on aluminum heat pipes developments and tests as well as the description of flat plate and evacuated tube solar collector experimental prototypes based on aluminum heat pipes and their tests are presented in the article. As it was proved by the experiments, new lightweight and inexpensive heat pipes have high thermal performances. Maximal heat transfer power of one heat pipe is not less than 210 W; and its thermal resistance is very low - from 0.02 to 0.07 C deg/W. Hydraulic resistance of flat plate solar collector and evacuated one, where aluminum profiled heat pipes are used, could be reduced to less than 100 Pa, and their thermal efficiency is rather high (up to 0.72). The prospects of solar collectors based on aluminum heat pipes application to water heating plants become evident due to their study.

Key words: heat pipe, solar collector, heat exchanger.

Введение

Несмотря на широкое распространение солнечных коллекторов (СК), их конструкции ещё далеки от совершенства. В связи с этим, в последнее время, большое внимание уделяется разработке СК на основе тепловых труб (ТТ). Использование ТТ в качестве высокоэффективных теплопринимающих и теплопередающих элементов позволяет ликвидировать ряд недостатков традиционных СК. Например, солнечные коллекторы на базе ТТ имеют более низкое гидравлическое сопротивление, в них отсутствует неравномерность течения жидкости; теплопринимающая поверхность таких коллекторов почти полностью изотермична.

На сегодняшний день, широкое распространение получили вакуумные солнечные коллекторы типа “двойная колба” и типа “одинарная колба” с медными ТТ [1]. Первый тип солнечных коллекторов состоит из двух стеклянных колб с отвакуумированным зазором между ними. При этом, абсорбером является внутренняя колба, на которое нанесено селективное покрытие. Тепловая энергия от стеклянного абсорбера отводится специальной конструкцией ТТ. Второй тип состоит из одной стеклянной колбы с отвакуумированным пространством и расположенной внутри ТТ. При этом, абсорбером является поверхность ТТ с плавником, на который нанесено селективное покрытие. Как показывает практика, такие ТТ могут быть надежны и долговечны в эксплуатации. Однако одна из основных проблем использования медных ТТ в вакуумных СК является обеспечение качественного контакта оболочки ТТ с теплопоглощающей (абсорбирующей) поверхностью. В традиционных конструкциях СК это обеспечивается дополнительными технологическими операциями: пайки, приварки либо прижатия ТТ к теплопоглощающей поверхности. Кроме того, немаловажной задачей является обеспечение эффективного отвода теплоты от оболочки ТТ к теплоносителю в теплообменнике СК при минимальном гидравлическом сопротивлении.

Для решения указанных проблем, авторы предлагают применять в солнечных коллекторах алюминиевые тепловые трубы [2, 3]. Технология изготовления таких ТТ позволяет одновременно получать как цилиндрическую оболочку тепловой трубы, так и, заодно с ней, плоскую теплопоглощающую поверхность. Таким образом, нет необходимости дополнительно решать вопросы по обеспечению хорошего теплового контакта ТТ с плоской поверхностью, появляется возможность принципиально изменить конструкцию теплообменника СК. Эти инженерные решения существенно снижают стоимость СК с алюминиевыми ТТ и улучшают гидравлические и теплотехнические характеристики коллекторов.

Алюминиевые тепловые трубы

Как показали исследования, наиболее рациональной конструкцией алюминиевой ТТ для СК может быть, так называемая, “плавниковая” (профильная) конструкция (рис. 1), когда оболочка ТТ изготавливается как одно целое с плоской теплопоглощающей и теплоотдающей поверхностями. В этом случае, термическое сопротивление контакта между ними отсутствует вообще. Кроме того, упрощается и удешевляется процесс изготовления СК.



Рис. 1 Плавниковая конструкция тепловой трубы

Тепловая труба, предназначенная для использования в СК, должна функционировать при углах наклона относительно горизонта от 0° (при горизонтальном расположении СК) до 90° (при вертикальном расположении СК). При этом, наличие капиллярной структуры внутри ТТ не только

обеспечивает стабильность её работы при горизонтальном расположении, но и снижает её термическое сопротивление и при иных углах наклона.

Выбор теплоносителя для ТТ определялся по следующим критериям:

- он должен иметь низкую температуру кипения (40...70°C), однако не терять работоспособность до температуры 250°C;
- температура его замерзания должна быть не менее минус 40°C;
- он должен обеспечить передачу максимального теплового потока не менее 150 Вт;
- срок службы теплоносителя и функционирования ТТ, не менее 20 лет.

В ходе разработки конструкции алюминиевых ТТ, изготовленных из сплава АД31 методом экструзии, проводились исследования термического сопротивления и максимальной теплопередающей способности ТТ при различных режимах работы. Изучалось влияние на их функционирование уровня температур, угла наклона и интенсивности теплоотвода. Испытания проводились на экспериментальном стенде, описание которого приведено в статье [4].

Результаты исследований алюминиевых тепловых труб

Перед началом исследований, были проведены испытания оболочек образцов алюминиевых ТТ на внутреннее избыточное давление. Результаты таких испытаний показали, что цилиндрические оболочки ТТ выдерживают избыточное давление не менее 200 атмосфер.

В ходе экспериментальных работ, для ТТ был подобран специальный теплоноситель, имеющий температуру замерзания ниже минус 40°C и обеспечивающий равновесную температуру (температуру стагнации) СК более 200°C. Максимальное давление пара теплоносителя при температуре до 200°C не превышает 30 атм.

Зависимость термического сопротивления ТТ от передающей тепловой мощности приведена на рис. 2. Термическое сопротивление (R_{tt} , К/Вт) определялось по следующей формуле:

$$R_{tt} = \frac{(t1 + t2 + t3) - (t5 + t6 + t7)}{3 \cdot Q}, \quad (1)$$

где $t1, t2, t3$, – температуры по ТТ в зоне теплоподвода, в °C;

$t5, t6, t7$ – температуры по ТТ в зоне теплоотвода, в °C.

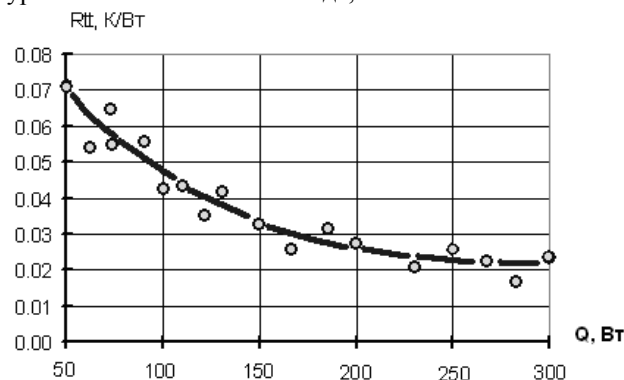


Рис. 2 Термическое сопротивление образцов ТТ в зависимости от передаваемой тепловой мощности при угле наклона от 0° до 90°

Термическое сопротивление экспериментальных образцов ТТ не превышает 0,07°C/Вт в диапазоне температур от 20 до 110°C и передаваемых тепловых мощностей от 50 Вт до 300 Вт. Изменение угла наклона практически не влияло на величину термического сопротивления и его характер. Таким образом, общий температурный перепад по образцам тепловых труб находился в диапазоне 3...7°C.

Исследования максимальной теплопередающей способности ТТ показали следующее:

- при угле наклона 0°, что соответствует горизонтальному расположению СК, максимальная теплотранспортная способность ТТ находилась в диапазоне 210...215 Вт благодаря наличию капиллярной структуры;
- при углах наклона выше 5° и до 90° (ТТ функционируют в режиме термосифона) максимальная теплотранспортная способность ТТ превышала 300 Вт.

Более низкие значения максимальной теплопередающей способности при малых углах наклона объясняются тем, что возврат теплоносителя в зону испарения ТТ начинает зависеть от

капиллярных сил и при угле наклона 0° полностью определяется только ими.

Выполненный комплекс конструкторских и исследовательских работ позволил получить образцы алюминиевых ТТ, пригодных для применения в СК.

Солнечные коллекторы на основе алюминиевых тепловых труб

Для проверки целесообразности использования алюминиевых ТТ в солнечных коллекторах, авторами был изготовлен опытный образец плоского СК (рис.3, а), со следующими характеристиками: длина - 2,13 м, ширина - 1,00 м, высота - 0,085 м, площадь теплопоглощающей анодированной (чёрной) поверхности - 1,98 м².

Панель коллектора, поглощающая теплоту солнечных лучей, состоит из восьми алюминиевых ТТ, изготовленных из плоского алюминиевого профиля. Теплота солнечных лучей воспринимается поверхностью ТТ и передаётся плоскому малогабаритному теплообменнику, расположенному на зонах их конденсации. Такая эффективная схема теплопередачи обеспечивает очень низкое гидравлическое сопротивление СК, что позволяет эффективно использовать гелиосистемы с большим количеством СК, применяя циркуляционные насосы с более низким энергопотреблением.

Последнее достоинство таких СК очень важно при их применении в автономных гелиосистемах, где энергообеспечение осуществляется за счет фотоэлектрических батарей и существует необходимость использования маломощных циркуляционных насосов. Как результат, такое решение способствует снижению окупаемости гелиосистем.



Рис. 3 Внешний вид солнечных коллекторов на базе алюминиевых тепловых труб: а) плоский СК; б) вакуумный СК.

Кроме того, использование алюминиевых ТТ позволяет создавать модульные конструкции гелиосистем различного вида и различной формы. Такие модульные системы могут собираться, как конструктор, из различного числа, различной длины и конфигурации ТТ. В этом случае появляется гибкость решений при проектировании и строительстве зданий. Это значительно облегчает использование гелиосистем не только в разных фасадах зданий, но и использовать их непосредственно в виде элементов строительных конструкций. Использование фасадных конструкций солнечных коллекторов имеет ряд преимуществ. Прежде всего, стеклянный фасад играет дополнительную роль прозрачной теплоизолирующей поверхности СК (рис. 4). А сам СК несет теплоизолирующую функцию здания. Что дает возможность снизить стоимостную часть солнечных коллекторов в общей стоимости здания в 1,2 ...1,3 раз. Также немаловажно, что конструкция таких ТТ позволяет легко модернизировать гелиосистему путем добавления ТТ без необходимости удаления теплоносителя из контура гелиосистемы и, собственно, без ее остановки и перезаправки.

Для оценки целесообразности использования алюминиевых ТТ в вакуумных солнечных коллекторах авторами был изготовлен опытный образец СК типа “двойная колба” (рис.3, б). Принципиальное отличие такого СК от плоского заключается в том, что в качестве теплопоглощающей поверхности использовались вакуумированные стеклянные колбы с селективным покрытием наружной поверхности внутренней трубы [1]. Теплопередача от

внутренней поверхности стеклянной трубы к ТТ осуществлялась за счет плавников, изготовленных из алюминиевой фольги.

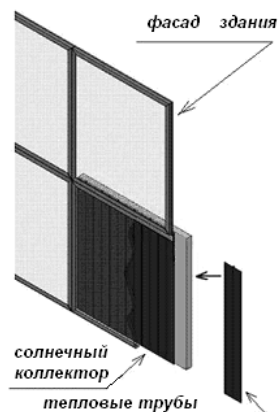


Рис.4. Применение тепловых труб в солнечных коллекторах для фасадов зданий

Опытный образец вакуумного СК с ТТ имел следующие характеристики: длина - 2,10 м, ширина - 1,35 м, толщина 0,1 м, площадь теплопоглощающей поверхности - 2,0 м², количество ТТ - 15, покрытие теплопоглощающей поверхности - селективное.

Исследование эффективности солнечных коллекторов

Исследование эффективности СК на основе алюминиевых ТТ проводилось на двух независимых действующих исследовательских гелиоустановках, расположенных на территории Автономной Республики Крым и в г. Киеве.

На рис. 5 представлены данные по тепловой эффективности двух конструкций СК на основе алюминиевых ТТ, в зависимости от параметра $x = \Delta t / E_{\text{пад}}$, т.е. отношения разности температур между теплопоглощающей поверхностью и окружающим воздухом к плотности падающего солнечного излучения $E_{\text{пад}}$. Из полученных экспериментальных данных следует, что плоский СК с ТТ по эффективности не уступает вакуумному, а при малых значениях x (низкая температура ТТ и воды в бойлере) даже превосходит его. Однако, данный вывод справедлив только для летнего периода года.

Эффективность СК определялась по методике, представленной в [4] и представляет собой отношение полезного теплового потока к общему тепловому потоку.

Также на рис.4 приведено сравнение экспериментальных значений эффективности опытных образцов СК на основе алюминиевых ТТ с солнечными коллекторами: как с медными тепловыми трубами (MT 58-1800, RC 58/1800), так и без тепловых труб (Vitosol 100-F).

Как показывают результаты исследований, СК на основе алюминиевых ТТ имеют довольно высокую эффективность. Для плоского СК наблюдается некоторое снижение его эффективности по сравнению с кривой 2, при значениях x равном 0,04...0,06. Это вызвано, прежде всего, отсутствием эффекта селективности покрытия. Также следует отметить, что в образце СК применялось обычное оконное стекло. Усовершенствовав данную конструкцию, можно увеличить эффективность СК и при высоких значениях параметра x .

Что касается вакуумного СК с алюминиевыми ТТ, значение его эффективности сравнимо с аналогами. В данном типе СК возможно также повысить его характеристики проведя исследовательские работы в направлении создания специального профиля алюминиевой ТТ, позволяющей более эффективно обеспечивать теплопередачу от поверхности стекла внутренней трубы к ТТ.

Следует заметить, что расчетное значение гидравлического сопротивления опытных образцов СК составляют всего 70 Па (вакуумный СК) и 10 Па (плоский СК) при расходе теплоносителя 130 литров в час. Тогда, как гидравлическое сопротивление плоского коллектора Vitosol 100-F, при том же расходе, 21 200 Па (по данным DIN CERTCO), а вакуумнотрубного СК с ТТ типа Vitosol 30H20 составляет 2 500 Па (по данным каталога фирмы).

Для подтверждения целесообразности использования СК с алюминиевыми ТТ была собрана полномасштабная гелиоустановка для горячего водоснабжения коттеджа (рис.6, а), расположенная в Киевском регионе Украины. В такой гелиоустановке используются четыре экспериментальные

вакуумные СК, конструкция которых аналогична опытному образцу вакуумного СК с алюминиевыми ТТ (рис.3, б). Гелиоустановка рассчитана на нагрев 460 литров воды.

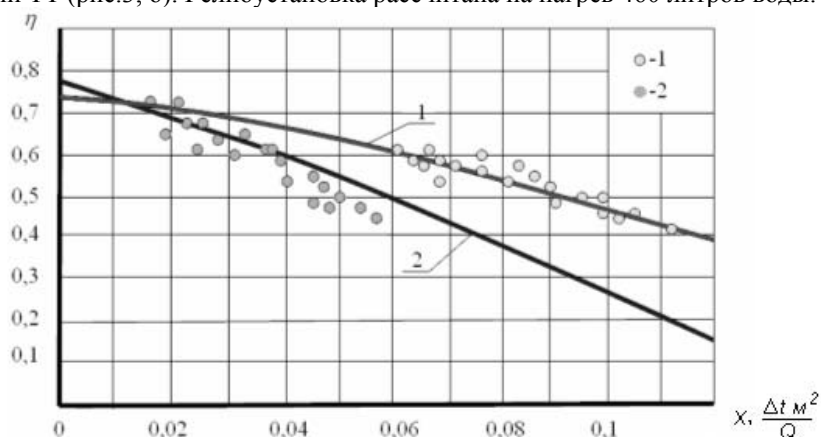


Рис.5. Коэффициент тепловой эффективности солнечных коллекторов.
 Кривая 1 – вакуумный СК, тип MT 58-1800 и RC 58/1800 (Германия), кривая 2 – плоский СК тип Vitosol 100-F (Германия).
 Кривые – данные сертификационного центра DIN CERTCO (для $E = 800 \text{ Вт/м}^2$),
 точки – экспериментальные данные авторов для СК вакуумного (точки 1) и плоского (точки 2).

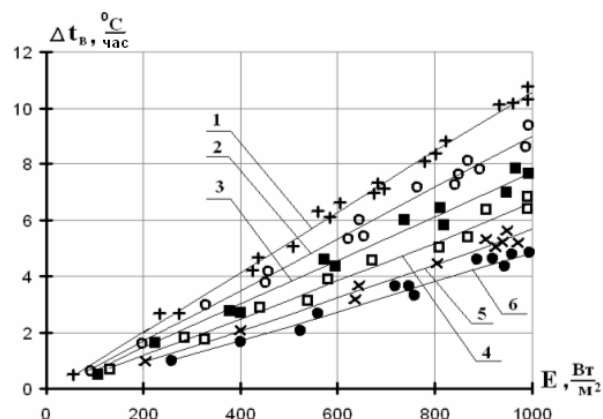
На данный момент, ресурс работы гелиосистемы составляет 4 года. Гелиосистема испытывалась в условиях многократного перегрева (достигала температуры стагнации). За срок эксплуатации не наблюдалось снижения эффективности гелиосистемы, а также выхода тепловых труб из строя.

Для того, чтобы убедиться в целесообразности использования гелиосистемы на протяжении всех сезонов года, ниже приведен график зависимости температуры воды в системе горячего водоснабжения от плотности солнечного излучения (рис.6, б).

Как это следует из полученных экспериментальных данных, минимальная плотность падающего на коллектор солнечного излучения $E_{\text{пад}}$, с которой он начинает функционировать, зависит от начальной температуры воды в бойлере и пребывает в диапазоне, так называемого, рассеянного излучения, в данном случае, от 60 Вт/м^2 при начальной температуре воды 10°C до 250 Вт/м^2 при 60°C . Иными словами, было подтверждено, что вакуумные СК успешно работают при низких значениях прямого солнечного излучения, что особенно важно в зимний и осенне-весенний периоды года.



а)



б)

Рис.6. Гелиосистема для обеспечения горячего водоснабжения коттеджа:

- а) – вакуумные СК с алюминиевыми ТТ;
- б) - зависимость перепада температуры воды в бойлере от плотности солнечного излучения, начальная температура воды: 1 – 10°C , 2 – 20°C , 3 – 30°C , 4 – 40°C , 5 – 50°C , 6 – 60°C .

Как видно из рис.б, б, чем ниже начальная температура воды в бойлере, тем выше темп нагрева воды, что объясняется функционированием СК при более высоких значениях коэффициентов тепловой эффективности (рис. 5).

Выводы

Данная работа показала возможность успешного использования алюминиевых тепловых труб в конструкциях солнечных коллекторов. Алюминиевые ТТ могут быть использованы как пассивный элемент СК и служить для эффективной передачи адсорбированного солнечного теплового потока к теплоносителю контура гелиосистемы.

Технология изготовления алюминиевых ТТ позволяет получать конструкцию тепловой трубы заодно с тепловоспринимающей поверхностью. Разработанные образцы ТТ обеспечивают передачу теплового потока более 210 Вт при углах наклона относительно горизонта от 0° до 90°.

Изготовленные и испытанные образцы плоского и вакуумного СК показали целесообразность использования в их конструкции алюминиевых ТТ. Расчетное гидравлическое сопротивление коллекторов составляет от 10 Па до 70 Па, что существенно снижает электропотребление циркуляционных насосов в гелиосистемах с большим количеством СК, а также в гелиосистемах с энергообеспечением от фотовольтаики.

Использование разработанных алюминиевых ТТ позволяет создавать модульные конструкции гелиосистем различного вида и формы. Это значительно облегчает применение не только автономных СК, например, на крышах, но и гелиосистем в фасадах зданий, а также использовать ТТ непосредственно в виде частей строительных конструкций. Кроме того, при модернизации СК с ТТ в составе гелиосистемы либо их ремонте нет необходимости удаления теплоносителя из контура гелиосистемы и можно производить эти операции без ее остановки и перезаправки.

Следующим шагом работ является усовершенствование конструкций плоского и вакуумного СК и проведение промышленных испытаний.

Литература

1. Dr. F. Mahjouri. "Vacuum Tube Liquid-Vapor (Heat-Pipe) Collectors" www.thermotechs.com. 2005. Thermo Technologies, Web. 16 Sep 2009. <<http://thermotechs.com/Downloads/Vacuum%20Tube%20Paper.pdf>>.
2. Baturkin V., B. Rassamakin, S. Khayrnasov, E. Shevel. Grooved heat pipes with porous deposit to enhance heat transfer in the evaporator. International Conference "Heat Pipes for Space application", Moscow, Russia, 15-18 September, 2009, p. 11. Laplace S, and Pascal W, "Effects of magnetic field to the water droplets" J. Physics. 20 (3), 395-399 (2005).
3. Б.М. Рассамакин, С.М. Хайрнасов, В.К. Зарипов, А.Б. Рассамакин. Солнечная водонагревательная установка с высокоэффективными типами коллекторов на основе алюминиевых тепловых труб // Нова тема. – 2010. – №3 (26). – С. 27-29. Возобновляемая энергетика
4. Б.М. Рассамакин, В.К. Зарипов, С.М. Хайрнасов, А.Б. Рассамакин, И.А. Матвийко. Стенд для испытаний солнечных коллекторов. Нетрадиційні і поновлювальні джерела енергії, як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні, Львів, 2-3 квітня 2009 рік, с. 234-238.