

2. Кузьмич, Р. Г. Диагностика, лечение и профилактика патологии яичников и яйцеводов у коров [Текст]: учеб.-метод. пос. / Р. Г. Кузьмич, Л. Н. Рубанец, А. А. Гарбузов и др. – Витебск: ВГАВМ, 2010. – 53 с.
3. Сасимова, И. А. Обоснование биофизического действия информационных электромагнитных излучений на микробиологические объекты животноводства [Текст] / И. А. Сасимова, Л. Ф. Кучин // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2008. – Т. 4, № 2 (34). – С. 27–29.
4. Михайлова, Л. Н. Применение электромагнитного поля крайневысокой частоты для лечения животных [Текст] / Л. Н. Михайлова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – Т. 1, № 9 (55). – С. 36–38. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/3439/3239>
5. Думанский, А. В. Использование микроволнового излучения в технологических процессах лечения животных и людей [Текст] / А. В. Думанский, М. В. Торчук, Л. Н. Михайлова // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – 2013. – № 141. – С. 89–91.
6. Попрядухин, В. С. Информационно-волновая терапия в ветеринарии и медицине в лечебных целях [Текст] / В. С. Попрядухин, Ю. М. Федюшко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – 2016. – № 175. – С. 158–160.
7. Думанский, А. В. Анализ управляющего воздействия информационных электромагнитных излучений на физико-химические процессы в биологических объектах [Текст] / А. В. Думанский, Л. Н. Михайлова // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – 2013. – № 142. – С. 83–86.
8. Воскресенский, Д. И. Устройства СВЧ и антенны [Текст] / Д. И. Воскресенский, В. Л. Гостюхин, В. М. Максимов, Л. И. Пономарёв. – М.: Радиотехника, 2006. – 376 с.
9. Думанский, А. В. Аналитический анализ антенной системы для лечения эндометрита животных [Текст] / А. В. Думанский, Л. Н. Михайлова // Вестник Национального технического университета "ХПИ". Новые решения в современных технологиях. – 2013. – № 70. – С. 69–74. – Режим доступа: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/vcpinrct\\_2013\\_70\\_14](http://nbuv.gov.ua/UJRN/vcpinrct_2013_70_14)
10. Думанский, А. В. Аналитический анализ гофрированного конического рупора для лечения эндометрита животных [Текст] / А. В. Думанский // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. – 2014. – Т. 8, № 126. – С. 66–71.

*Рекомендовано до публікації д-р техн. наук Черенков О. Д.  
Дата надходження рукопису 18.11.2016*

**Попрядухин Вадим Сергеевич**, ассистент, кафедра теоретической и общей электротехники, Таврический государственный агротехнологический университет, пр. Б. Хмельницкого, 18, г. Мелитополь, Украина, 72310  
E-mail: [tte\\_nniect@ukr.net](mailto:tte_nniect@ukr.net)

УДК:621.472(043)

DOI: 10.15587/2313-8416.2017.92405

## **ВЫБОР И РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОЙ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ГЕЛИОКОЛЛЕКТОРА С ВАКУУМИРОВАННЫМИ ТРУБЧАТЫМИ ТЕПЛОПРИЁМНИКАМИ**

© С. Ю. Хотин, А. Е. Васильченко

*На основе выполненных расчётов определена оптимальная гидравлическая схема гелиоколлектора с вакуумированными трубчатыми теплоприёмниками на базе концентратора солнечной радиации типа Д-фоклин, которая должна обеспечивать равномерное распределение теплоносителя по всей трубной решетке с наименьшим гидравлическим сопротивлением. Осуществлённые исследования позволяют обеспечить надёжную работу концентрирующего гелиоколлектора с максимальной теплотехнической эффективностью в температурном диапазоне 100-200 °С*

**Ключевые слова:** гидравлическая схема, гелиоколлектор, абсорбер, теплоноситель, трубчатые теплоприёмники, сопротивление, расход, поток, расчёт

### **1. Введение**

Расширяющиеся с каждым годом во всём мире промышленное использование солнечных энергосистем в различных сферах экономики обосновывает актуальность и целесообразность дальнейших исследований по проблемам разработки и созданию эффективных гелиотехнических установок, предназначенных для горячего водоснабжения и генерации пара низких параметров.

В настоящее время наиболее широкое применение для этих целей находят концентрирующие гелиоколлекторы. В температурном диапазоне 100–150 °С

они имеют более высокий тепловой КПД, чем обычные плоские коллекторы и эффективно работают при температурах около 200 °С, недостижимых для последних. Наиболее распространены гелиоколлекторы, оснащенные концентраторами типа фоклин. Они компактны, имеют невысокую себестоимость, не требуют систем суточного слежения за Солнцем, что делает их удобными в эксплуатации. Дальнейшее совершенствование гелиоколлекторов этого типа и оснащение их вакуумированными трубчатыми теплоприёмниками (ВТТ) позволит обеспечить потребности в энергии ряда технологических процессов и

бытовых потребителей. Надежность и теплотехническая эффективность работы трубчатого гелиоколлектора во многом зависят от правильного выбора его гидравлической схемы, которая должна обеспечивать равномерное распределение теплоносителя по всей трубной решетке с наименьшим гидравлическим сопротивлением. В нашем случае основные элементы гидравлической схемы – абсорберы ВТТ, представляющие собой прямые стеклянные трубки, на которых, нанесено селективное покрытие, поглощающее энергию солнечного излучения. Необходимо, чтобы каждая из них работала с максимальным тепловым КПД и минимальными энергозатратами на прокачку теплоносителя, что обеспечит максимальную производительность всей солнечной энергосистемы и высокий уровень экономической рентабельности при её внедрении в промышленную эксплуатацию. Вышеуказанные факторы определяют необходимость дальнейших исследований теплофизических и гидротехнических характеристик данных гелиосистем с целью их дальнейшего совершенствования.

## 2. Литературный обзор

В концентрирующих гелиоколлекторах обычно применяют два основных варианта гидравлической схемы: первый – параллельно-противоточная схема, второй – змеевикового типа, с последовательным подключением трубчатых теплопоглощителей [1, 2]. Параллельно-прямоточную схему применяют крайне редко из-за неравномерного распределения теплоносителя по абсорберам.

В качестве теплоносителей используют воду при температурах до 100 °С, а в температурном диапазоне 100–200 °С светлые нефтяные масла, чаще всего МС-20, которое имеет наилучшие теплофизические характеристики [1, 3].

Если гидротехнические расчёты концентрирующих гелиоколлекторов с традиционными металлическими теплоприёмниками проводились ранее и результаты их хорошо известны [4, 5], то аналогичные расчёты для солнечных коллекторов на базе стеклянных ВТТ выполнены не были. Следует также отметить, что вышеуказанный тип гелиоколлекторов работает при более высоких температурах чем коллектора с металлическими теплоприёмниками и имеет ряд специфических конструктивных особенностей. Всё вышесказанное обуславливает целесообразность выполнения гидротехнических расчётов для определения их оптимальной гидравлической схемы.

## 3. Цель и задачи исследования

Цель исследования – выбор расчётным путём оптимальной гидравлической схемы концентрирующего гелиоколлектора на базе ВТТ, которая обеспечит его высокие теплотехнические характеристики в температурном диапазоне 100–200 °С при минимальных энергозатратах на прокачку теплоносителя.

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие задачи:

– определить с помощью расчётов тип гидравлической схемы гелиоколлектора, имеющий наименьшее сопротивление;

– разработать конструктивную схему гидравлического тракта гелиоколлектора, обеспечивающую наиболее равномерное распределение расхода теплоносителя по всем ВТТ и, одновременно, их одинаковую тепловую нагрузку.

## 4. Методика и математический аппарат для исследования гидравлических характеристик концентрирующих гелиоколлекторов на базе ВТТ

Для решения поставленных задач воспользуемся методикой расчета и математическим аппаратом, предложенными в [5, 6].

Параллельно-противоточная гидравлическая схема гелиоколлектора представлена на рис. 1.

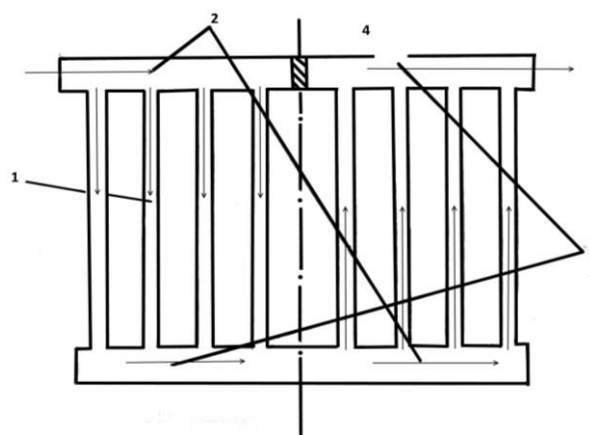


Рис. 1. Параллельно-противоточная гидравлическая схема гелиоколлектора

Примечание: 1 – абсорберы ВТТ; 2 – раздаточные гидравлические коллекторы; 3 – сборочные гидравлические коллекторы; 4 – перегородка. Стрелками показано направление движения теплоносителя

Если представленную схему коллектора разделить на две части по центральному поперечному сечению, то видно, что и правая и левая части одинаковы и каждая из них представляет собой типовую схему, так называемого Z-образного коллектора [6], а рассматриваемый вариант гидравлической схемы (рис. 2) представляет собой два, последовательно подключенных Z-образных коллектора.

Распределение теплоносителя осуществляется из входного раздаточного коллектора. Выходной собирающий коллектор собирает и отводит теплоноситель ко второму Z-образному коллектору. В раздаточном коллекторе теплоноситель движется с отбором расхода по пути в каналы абсорберов, а в сборочном – движение теплоносителя происходит с присоединением расхода по направлению его движения из абсорберов.

На элементы гидравлической схемы накладываются ряд требований:

– незначительное изменение статического давления по ходу потока. В противном случае возрастают гидравлические неравномерности в каналах абсорберов;

– отсутствие вихреобразования и больших неравномерностей профиля скорости потока жидкости, иначе в гидравлическом тракте гелиоколлектора не

только увеличиваются неравномерности, но и появляются пульсации расхода теплоносителя в абсорберах;  
 – средняя скорость потока не должна значительно или скачкообразно уменьшаться по ходу движения, а в гидравлическом тракте должны отсутствовать острые кромки, резкие повороты и т.п. Следовательно, важной задачей гидравлического расчета этой схемы является определение численных значений неравномерностей в распределении расхода теплоносителя по каналам абсорбера.

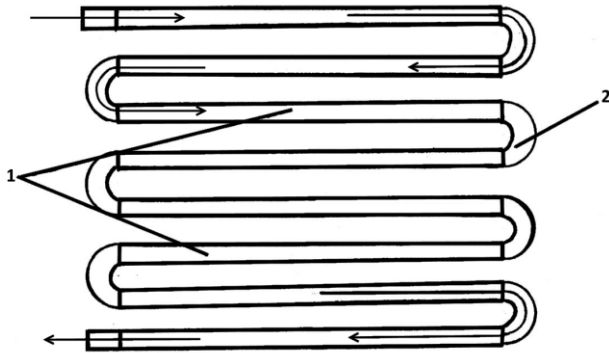


Рис. 2. Гидравлическая схема гелиоколлектора змеевикового типа: 1 – абсорберы ВТТ; 2 – U-образные соединительные трубки

Степень неравномерности раздачи (отбора) потока по боковым ответвлениям трубчатого коллектора определена эмпирически и оценивается величиной специального безразмерного параметра, называемого характеристикой коллектора (A).

Для Z-образного коллектора

$$A = 1,41e\sqrt{1/(0,25e^2 + 1,75 + \xi_{абс})}, \quad (1)$$

где  $e = SF_{\sigma}/F_n$  – отношение суммарной площади боковых ответвлений к площади сечения раздаточного (сборочного) коллектора;  $\xi_{абс}$  – коэффициент гидравлического сопротивления трения канала абсорбера.

При ламинарном течении

$$\xi_{абс} = 64/R_e, \quad (2)$$

где  $R_e = wd_b/\gamma$ ;  $w$  – скорость потока, м/с;  $d_b$  – внутренний диаметр абсорбера, м;  $\gamma$  – кинематическая вязкость жидкости, м<sup>2</sup>/с.

Течение жидкости является ламинарным при  $R_e < 2000$ .

Скорость потока определяется соотношением

$$w = G/q\pi r^2, \quad (3)$$

где  $G$  – массовый расход теплоносителя, кг;  $q$  – плотность теплоносителя, кг/м<sup>3</sup>;  $r$  – внутренний радиус абсорбера, м.

Следует отметить, что равномерная раздача теплоносителя (с точностью  $\pm 10\%$ ) обеспечивается при  $A < 0,5$ .

Гидравлическое сопротивление в Па для Z-образного коллектора может быть определено:

$$\Delta P_z = (1 - 0,25A^2)^2/A^2, \quad (4)$$

для рассматриваемой схемы гелиоколлектора (4) будет иметь вид:

$$\Delta P = 2(1 - 0,25A^2)^2/A^2. \quad (5)$$

Для Z-образного коллектора отношение скорости движения в каждом отдельно взятом абсорбере к средней скорости теплоносителя в них определяется из соотношения:

$$w_x/w_{cp} = 1 + 0,25A^2 - 0,5A^2x', \quad (6)$$

где  $x' = x/L$ ;  $x$  – расстояние, на котором находится входное отверстие абсорбера от начала раздаточного (сборочного) коллектора, м;  $L$  – длина раздаточного и сборочного коллекторов, м.

Гидравлическая схема гелиоколлектора змеевикового типа с последовательным подключением ВТТ представлена на рис. 2, Направление движения теплоносителя показано стрелками.

Гидравлическое сопротивление такой схемы гелиоколлектора [5] определяется выражением:

$$\Delta P = \Delta P_{тр} + \Delta P_{мс}, \quad (7)$$

где  $\Delta P_{тр}$  – гидравлическое сопротивление трения, Па;  $\Delta P_{мс}$  – местные гидравлические сопротивления, Па.

$$\Delta P_{тр} = \Delta P_{тр.абс.} + \Delta P_{тр.соед.}, \quad (8)$$

где  $\Delta P_{тр.абс.}$  – гидравлическое сопротивление трения в абсорберах, Па;  $\Delta P_{тр.соед.}$  – гидравлическое сопротивление трения соединительных трубок, Па.

$$\Delta P_{тр.абс.} = n \cdot \xi_{тр.абс.} \cdot L_{абс.} \cdot w^2 \rho / 2d_{вн}, \quad (9)$$

где  $n$  – количество ВТТ в гелиоколлекторе;  $L_{абс.}$  – длина абсорбера.

Для соединительных трубок формула (8) принимает вид:

$$\Delta P_{тр.соед.} = n' \cdot \xi_{тр.соед.} \cdot L_{соед.} \cdot w^2 \rho / 2d_{вн}, \quad (10)$$

где  $n'$  – количество соединительных трубок;  $L_{соед.}$  – линейная длина канала соединительной трубки, м;  $\xi_{тр.соед.} = \xi_{тр.абс.}$  – коэффициент сопротивления соединительной трубки.

Местные сопротивления будут иметь место в U-образных соединительных трубках за счет изменения направления движения потока жидкости на 180°.

Величина местных сопротивлений гелиоколлектора в рассматриваемой схеме определяется соотношением:

$$\Delta P_{мс} = n'' \cdot \xi_{мс} \cdot \rho \cdot w^2 / 2, \quad (11)$$

где  $\xi_{мс}$  – коэффициент местного сопротивления, который может быть определен по справочным данным, предложенным в [7], по таким параметрам

как угол поворота потока жидкости и отношению радиуса кривизны трубок к их внутреннему диаметру. В нашем случае  $\xi_{mc}=0,23$ . Определим гидравлическое сопротивление предложенных схем при использовании в них в качестве теплоносителей воды и масла МС-20, основные параметры которых представлены в табл. 1.

Результаты расчетов сведены в табл. 2 и 3.

Результаты выполненных расчетов, представленные в табл. 2 и 3, показывают, что сопротивление гидравлического тракта гелиоколлектора с ВТТ, выполненного по параллельно-противоточной схеме,

почти в 30 раз меньше чем у гелиоколлектора с последовательным подключением ВТТ.

Таблица 1  
Основные параметры теплоносителей

Наименование теплоносителя	Температура, °С		Расход, кг/с
	на входе	на выходе	
Вода	25	85	0,025
Масло МС-20	80	140	0,015

Таблица 2

Результаты гидравлического расчета параллельно-противоточной схемы

Наименование теплоносителя	Re	A	$X_{abc}$	$\Delta P$ , Па
Вода	205,73	0,2074	0,2835	43,49
Масло МС-20	53,42	0,3250	0,8188	131,15

Таблица 3

Результаты гидравлического расчета схемы змеевикового типа с последовательным подключением ВТТ

Наименование теплоносителя	Re	$X_{abc}$	$X_{mc}$	$\Delta P_{тр}$ , Па	$\Delta P_{mc}$ , Па	$\Delta P$ , Па
Вода	822,92	0,0790	0,23	1253,20	5,05	1258,25
Масло МС-20	213,68	0,2995	0,23	4189,02	3,24	4192,26

### 5. Результаты исследования и их обсуждение

Данные результатов исследования свидетельствуют, что гидравлическое сопротивление схемы змеевикового типа с последовательным подключением ВТТ многократно превышает сопротивление параллельно-противоточной схемы. Гидравлические неравномерности в абсорберах ВТТ у последней не будут превышать 10 % от номинала, поскольку величина характеристики коллектора  $A < 0,5$  как при использовании воды так и масла в качестве теплоносителя. Таким образом, параллельно-противоточная схема может быть рекомендована для практического применения. Следует отметить, что физико-технические параметры системы Д-фоклин-ВТТ и гелиоколлекторов на их базе, полученные в результате численного моделирования, не противоречат сведениям, приведенным в публикациях, посвященных этой тематике [8–10] и др. Также к достоинствам гелиоколлекторов, выполненных по параллельно-противоточной схеме, можно отнести то, что они более удобны для сборки и технического обслуживания. Кроме того они могут функционировать в случае демонтажа одного из ВТТ, при наличии заглушек на соединительных патрубках.

### 6. Выводы

Выполненные исследования показывают.

1. Наиболее рациональной гидравлической схемой гелиоколлектора, позволяющей обеспечить его эффективную и надежную работу при минимальных значениях гидравлического сопротивления и неравномерностей, является параллельно-противоточная схема.

2. Конструктивное устройство гидравлического тракта гелиоколлектора, реализованное на основе параллельно-противоточной схемы в виде комбинации двух последовательно подключенных Z-образных коллекторов, обеспечивает высокое значение его энергетического КПД при равномерной тепловой нагрузке каждого абсорбера ВТТ и минимальных энергозатратах на прокачку теплоносителя.

Таким образом, была доказана целесообразность применения данной гидравлической схемы при проектировании гелиоколлекторов, оснащенных линейными концентраторами солнечной радиации на базе ВТТ и других трубчатых теплоприёмников.

### Литература

- Хотин, С. Ю. Разработка и исследование концентрирующего коллектора с вакуумированными теплоприёмниками [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / С. Ю. Хотин. – К., 2001. – 185 с.
- Даффи, Дж. Основы солнечной теплоэнергетики [Текст]: уч.-справ. рук. / Дж. Даффи, У. Бекман. – М.: Интеллект, 2013. – 888 с.
- Чаховский, В. М. Выбор рабочего теплоносителя двухконтактных схем солнечных энергоустановок [Текст] / В. М. Чаховский, В. А. Пожарнов // Гелиотехника. – 1990. – № 1. – С. 79–81.

4. Бекман, У. Расчет системы солнечного теплоснабжения [Текст] / У. Бекман, С. Клейн, Дж. Даффи. – М.: Энергоиздат, 1982. – 80 с.
5. Schweiz. Maschinenmarkt. Solarelemente zur Warmwasserherstellung Hohere Leistungs – fahigkeit [Text]. – Solar Energy. – 1988. – Vol. 32, Issue 4. – P. 218–224.
6. Raducanu, C. Centrale Heliotermoelectrice hibride. Variante energetice [Text] / C. Raducanu, C. Popescu // Energetica. – 1989. – Vol. 8. – P. 354–357.
7. Клименко, А. В. Теплоэнергетика и теплотехника. Общие вопросы [Текст]: справочник / А. В. Клименко, В. М. Зорин. – М.: МЭИ, 1999. – 528 с.
8. Lazzarin, R. M. Comparative performances of evacuated tubular collectors in dhw heating [Text] / R. M. Lazzarin, L. Schibuola // Advances In Solar Energy Technology. – 1988. – Vol. 1. – P. 778–782. doi: 10.1016/b978-0-08-034315-0.50150-6
9. Perers, B. Comparison of thermal performance for flat plate and evacuated tubular collectors [Text] / B. Perers // Advances In Solar Energy Technology. – 1988. – Vol. 1. – P. 615–619. doi: 10.1016/b978-0-08-034315-0.50118-x
10. Хотин, С. Ю. Вакуумированные трубчатые теплоприёмники [Текст] / С. Ю. Хотин, Р. С. Бабаян, С. О. Мамедниязов, Л. Б. Беграмбеков. – Ашхабад, 1991. – 4 с.

*Рекомендовано до публікації д-р техн. наук Загребнюк В. І.*

*Дата надходження рукопису 05.01.2017*

**Хотин Сергей Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент, кафедра "Безопасность жизнедеятельности, экология и химия", Одесский национальный морской университет, ул. Мечникова, 34, г. Одесса, Украина, 65029  
E-mail: enhelios@ukr.net

**Васильченко Александра Евгеньевна**, старший лаборант, кафедра "Безопасность жизнедеятельности, экология и химия", Одесский национальный морской университет, ул. Мечникова, 34, г. Одесса, Украина, 65029  
E-mail: alexa.od@mail.ru