

Примечание.

Данное описание предложено сотрудником Midwest Reserch Institute (MRI), подрядчиком правительства США в соответствии с контрактом № DE-AC36-99GO10337.

Следовательно Правительство и MRI обладают неэксклюзивным безвыгодным правом публиковать и распространять данную информацию, или выдавать разрешение на это другим лицам в интересах Правительства.

Этот доклад подготовлен как отчет о работе спонсированной Правительством. Ни Правительство, ни его подразделения или сотрудники не несут ответственности за точность, полноту или полезность предоставляемой информации, так как ее использование не нарушает права частной собственности. Ссылки в этом отчете на любой коммерческий продукт, процесс, услугу или производителя не обязательно сделаны на основе распоряжений или одобрения Правительства. Взгляды и мнения авторов отчета не обязательно совпадают или отражают взгляды Правительства или его подразделений.

СОЛНЕЧНЫЙ КОЛЛЕКТОР ИЗ ВАКУУМНЫХ ТРУБОК, КОТОРЫЙ ПРИМЕНЯЛСЯ В СИСТЕМЕ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ФЕДЕРАЛЬНОГО ЗДАНИЯ.

Авторы:

Энди Уолкер (Национальная лаборатория возобновляемой энергии, 1617 Cole Blvd. Golden, Colorado 80401 andy_walker@nrel.gov)

Фариборц Мажури (ThermoTechnologies 5560 Sterrett Place, Suite 115 Columbia, MD 21044 mahjour@thermotechs.com)

Роберт Стритедер (Mid-Atlantic Social Security Center 300 Spring Garden St. Philadelphia PA 19123)

ВВЕДЕНИЕ

Этот документ описывает идею, моделирование, конструкцию и измеренные начальные характеристики солнечной системы подогрева воды (коллектор состоит из 360 трубок, занимаемая площадь 54 м^2 , площадь поглощающая солнечное излучение 36 м^2), которая установлена в верхней части системы снабжения горячей водой Social Security Administration's (SSA) Mid-Atlantic Center в Филадельфии. Когда имеется в наличии солнечное излучение, вода поступающая в бак горячей воды подогревается системой из вакуумных коллекторов. Этот новый подход, в отличие от стандартного предварительного подогрева входящей воды, становится возможным благодаря thermal diode effect вакуумных трубок низкими значениями тепловых потерь коллектора. Простота этого подхода и его низкая установочная стоимость делает солнечную энергетику привлекательной для подогрева воды в коммерческих зданиях, особенно, если крыша находится на некотором расстоянии от системы горячего водоснабжения (то есть если система горячего водоснабжения находится в подвале). В данном отчете приведены предварительные данные замера характеристик.

Полученные результаты предполагают ежегодное получение солнечного тепла в размере 111 ГДж и эффективность солнечного коллектора (основанная на 54 м² занимаемой площади) 41%. Эффективность всей системы, которая включает потерю мощности на работу насосов для прокачки горячей воды во избежание замерзания составит 34%. Средняя ежегодная эффективность солнечного коллектора, основанная на рабочей площади 36м², составит 61,5% (исходя из данных почасовых замеров)

СОКРАЩЕНИЯ

A_c = площадь поглощения солнечного тепла

A_{loop} = площадь поверхности системы горячего водоснабжения здания

C = удельная теплоемкость воды (кВтчас/кг°С)

G = освещенность (Вт/м²)

I_c = солнечное излучение за месяц (кВтчас/день)

I_{ave} = ежегодное среднее дневное солнечное излучение (кВтчас/м²/день)

L = дневные потребности для подогрева воды (кВтчас/день)

M = масса горячей воды, используемой ежедневно (кг/день)

$Q_{collected}$ = ежегодное количество тепла произведенное коллектором исходя из уравнения 2 (ГДж/год).

$Q_{delivered}$ = ежегодное количество тепла, доставленное в систему с учетом потерь (ГДж/год)

$Q_{freeze\ protection}$ = ежегодное дополнительное количество тепла, требуемое для поддержания температуры в системе выше 4 °С (ГДж/год).

T_a = температура наружного воздуха (°С)

T_{cold} = среднегодовая температура воды в системе (°С)

T_{hot} = температура доставленной горячей воды (°С)

T_{indoor} = температура внутри здания (°С)

T_m = средняя температура коллектора $(T_{outlet} + T_{inlet})/2$ (°С)

U_{loop} = коэффициент потерь тепла в системе (Вт/м²°С)

$\eta_{collector}$ = КПД солнечного коллектора

η_{system} = КПД солнечной системы



Рис. 1. Фотография системы солнечных коллекторов в юго-западной части системы горячего водоснабжения. Система в северо-восточной части аналогична. Mid-Atlantic Social Security Center, Philadelphia, PA.

ВСТУПЛЕНИЕ

В 2002 году Mid-Atlantic Social Security Center в Филадельфии, PA (40° N, 75° W) был переведен на отопление горючим из-за высоких цен на природный газ. Центр также начал рассмотрение подогрева воды при помощи альтернативной, возобновляемой солнечной энергии. Несколько подрядчиков предложили плоские коллекторы и идею предварительного подогрева воды на входе в существующую систему горячей воды здания. Это означало, что для высокого городского здания (8 этажей, 38 метров) необходимо огромное количество труб, которые бы тянулись с крыши здания в его подвал, где находились большие баки -аккумуляторы для предварительно подогретой воды. Также необходим регулятор температуры для управления потоками воды.

SSA и GSA выбрали менее затратный вариант, при котором предполагалось использование вакуумных трубок, а также отсутствие дополнительных трубопроводов и баков. Вместо предварительного подогрева, система воду "перенагревает". Перенагрев воды возвращающейся в систему водоснабжения при использовании плоских коллекторов будет неэффективным. Однако использование вакуумных коллекторов со значительно меньшим коэффициентом потерь делает выгодным добавление солнечной системы к верхней части системы горячего водоснабжения, причем без дополнительных баков-аккумуляторов и трубопроводов. Для регулирования температуры, а также для предотвращения замерзания и перегрева потребуются насосы и регуляторы. Данный подход, при котором вода "перенагревается" описан в руководстве ASHRAE Active Solar Systems Design Manual, но он не имеет широкого распространения и рекламы.

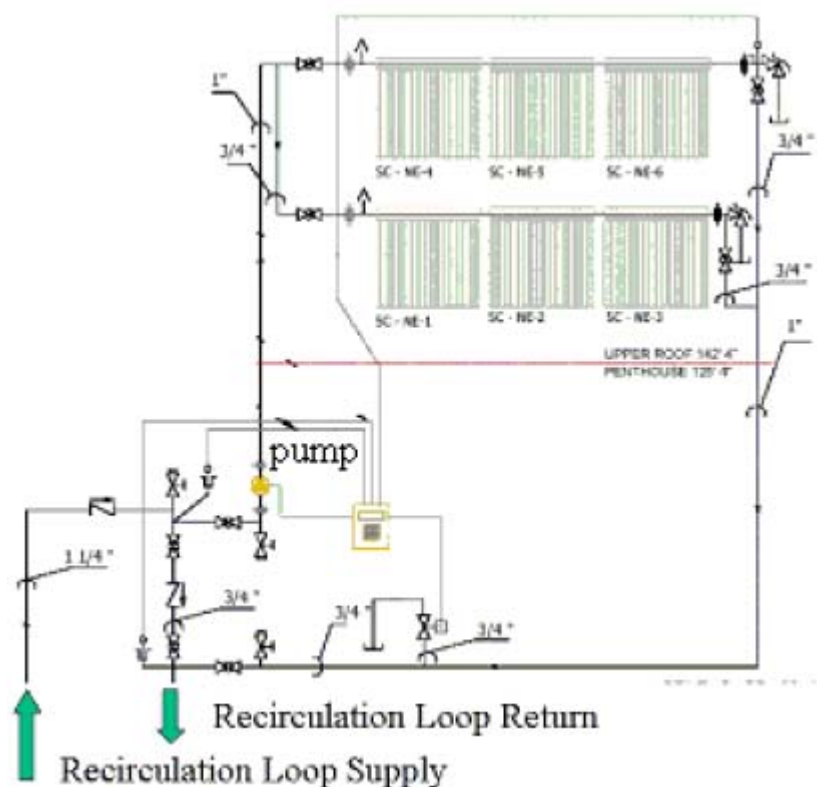
ЗАДАЧА: Система горячего водоснабжения коммерческого здания.

система может быть использована для снижения затрат путем внедрения солнечного коллектора в систему водоснабжения коммерческих зданий. Согласно доклада Департамента по Энергии 1,15 ЕДж из 18,5 ЕДж используемых коммерческими зданиями (примерно 7%) тратятся на подогрев воды. Из них всего 0,02ЕДж получают путем использования солнечных водонагревателей. В 2001 году 26 производителей сделали 1,039 млн. м² (приблизительно 4500 установок) солнечных коллекторов, из которых 1 млн м² - это низкотехнологичные установки для подогрева воды в бассейнах.

Подогрев воды занимает небольшую часть энергопотребления если рассматривать только коммерческие здания, но для многих других зданий она значительна. Таблица 1 показывает, что нагрев воды составляет значительную часть в зданиях больниц, школ, прачечных и общественных учреждений. Подход, описанный в этом отчете - это один из путей внедрения солнечных нагревателей и, таким образом, развития рынка.

Таблица 1. Энергоемкость (МДж/м²/год) различных типов коммерческих зданий для нагрева воды и остальных нужд (обогрев, освещение, охлаждение, др).

Типы зданий	Нагрев воды	Всего
Офисы	99	1027
Торговые	58	790
Образование	198	851
Здравоохранение	715	2002
Квартиры	583	1130
Общественные	199	927
Питание	312	2738
Склады	23	499
Продажа продуктов	103	2295
Нежилые	59	300
Общественного порядка	266	986
Другие	174	1635
Все типы зданий	157	1027



Pump	- насос
Recirculation Loop Return	- возвратная магистраль
Recirculation Loop Supply	- магистраль нагнетания

Рисунок 2. Схема системы солнечного подогрева воды, которая применялась для горячего водоснабжения коммерческого здания Mid-Atlantic Social Security Center.

Описание системы солнечного подогрева воды.

Mid-Atlantic Social Security Center, подобно остальным большим зданиям, имеет систему, позволяющую снабжать горячей водой все этажи. В специальном помещении (penthouse) на 8-м этаже система разворачивается и направляет воду в бойлер для нового подогрева. Если позволяет погода (имеется достаточное количество солнечной энергии), то система водоснабжения перекрывается и вода направляется вместо бойлера в систему солнечных коллекторов. На Рисунке 2 показана схема системы.

Если нет необходимого количества солнечной энергии, то горячая питьевая вода, попав к распределительному крану снова идет в подвал в бойлер, минуя солнечный коллектор. Если температура солнечного коллектора превышает температуру системы водоснабжения на 4°C, включается солнечный насос и вода поступает в коллекторы. Подогретая Солнцем вода возвращается в систему водоснабжения и, соответственно, в баки-аккумуляторы и бойлер в подвале. Таким образом уменьшается количества топлива, сжигаемого бойлером.

Система солнечных коллекторов состоит из 2-х подсистем, которые в свою очередь включают в себя по 180 вакуумных трубок. Подсистема состоит из 6 коллекторов. Общая

рабочая площадь $53,9 \text{ м}^2$, включая пространство между трубками. Чистая поглощающая площадь 36 м^2 . Одна подсистема находится на юго-западной стороне здания, а другая, аналогичная, на северо-восточной. Подсистемы коллекторов установлены на плоской крыше с помощью утяжелительных блоков без нарушения крыши. Использование вакуумных трубок уменьшает парусный эффект, что делает их более удобными в сравнении с плоскими коллекторами. Для ветра скоростью 40 м/с подъемная сила равна 700 N , а сила сопротивления - 1190 N (для плоских коллекторов той же площади ($4,5 \text{ м}^2$) силы составляют 5360 N и 8930 N соответственно).

Существующая стандартная система может при необходимости дополнительно нагревать воду. В этом случае существующие обратные трубопроводы служат одновременно как нагнетающие, так и отводящие. Очень простая по сути схема основана на работе регуляторов защиты от перегрева и переохлаждения.

Защита от переохлаждения обеспечивается контролем температуры коллектора (T_c). Независимо от разности температур (ΔT), насос вступает в работу и прогоняет воду через коллекторы, если в них температура ниже установленного значения ($T_c < 4^\circ\text{C}$). Насосы работают кратковременно. (30 м длины солнечных коллекторов и производительность 22 л/мин делают необходимой работу насосов менее 1 минуты). Подогрев 15 метров магистралей солнечных коллекторов приводит ощутимым потерям, но их значение невелико по сравнению с доставленным ими количеством тепла.

Защита от перегрева осуществляется активным и пассивным способами. Максимальная температура в системе солнечных коллекторов контролируется следующим образом: циркуляционный насос в системе коллекторов выключается при достижении 80°C . Магнитный клапан сливает горячую воду в дренаж, при достижении 85°C . Перекрывные клапаны в системе солнечных коллекторов перекрывают линию возврата в систему водоснабжения. Таким образом пар оказывается изолированным в системе коллекторов и его температура достигает 150°C . Из-за больших потребностях здания в горячей воде такой перегрев предполагается крайне редко. Но это может случиться, если система водоснабжения отключена.

ВАКУУМНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ КОЛЛЕКТОРЫ

Перенагрев воды в системе водоснабжения, в отличие от предварительного подогрева, требует эксплуатации коллекторов с низким коэффициентом потерь. В настоящее время это достигается при использовании вакуумных солнечных коллекторов. Они представляют собой систему из нагревательных трубок, изолированных стеклянной колбой из которой откачан воздух до давления $10\text{E-}05 \text{ mbar}$. Глубокий вакуум в стеклянных колбах исключает потери связанные с конвекцией и теплопередачей. Остаются только потери связанные с излучением. В результате испытаний проведенных Hochschule Rapperswil of Switzerland установлены следующие характеристики:

$$\eta_{\text{coll}} = 0.84 - 2.02 (T_m - T_a)/G - 0.0046 G [(T_m - T_a)/G]**2. \quad (1)$$

, что согласуется с результатами испытаний Florida Solar Energy Center:

$$\eta_{\text{collector}} = 0.82 - 2.19 (T_m - T_a)/G$$

где T_m - средняя температура коллектора

$(T_{\text{outlet}} + T_{\text{inlet}})/2$ [°C] - температура окружающего воздуха

и G - плотность потока излучения (Вт/м^2). Оба уравнения базируются на площади поглощения излучения, а не площади занимаемой коллекторами. В данном случае площадь поглощения составляет 67% процентов занимаемой коллекторами площади. Если в расчетах будет использоваться занимаемая площадь, то коэффициент потерь уравнения 2 будет 0,53 и -1,42 Вт/м^2 соответственно.

Каждая вакуумная трубка содержит герметичную медную трубку. Медная трубка обмотана теплопоглощающим слоем. Солнечное излучение превращается в тепло и передается жидкости в медных трубках, испаряя ее. Испарения поднимаются в верх и, отдавая тепло рабочему телу (воде), конденсируются и под действием гравитации стекают в нижнюю часть трубки. Поглощающее покрытие имеет эффективность более 92% в спектре солнечного излучения и коэффициент излучения менее 6% в спектре инфракрасного излучения (373K). Покрытие изготовлено методом напыления в атмосфере высокого вакуума и состоит из 3 шагов: 1) стабилизирующий слой титана 2) окисление титана кислородом, создающее полупроводниковый слой для поглощения излучения, 3) антиотражающий слой.

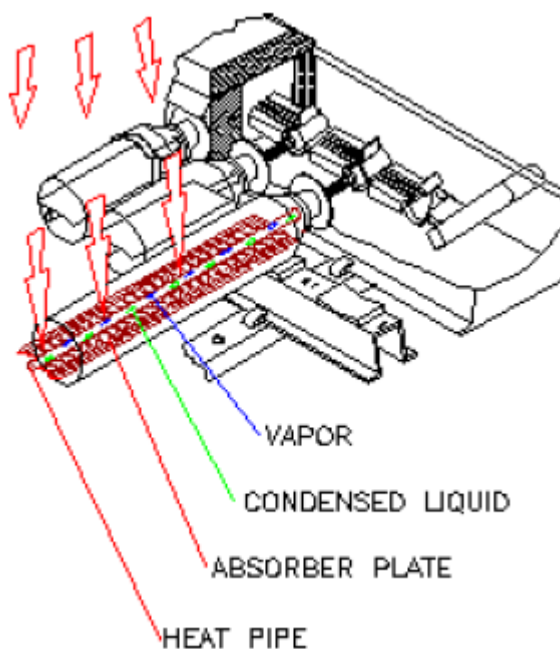


Рисунок 3. Детали вакуумного солнечного коллектора

Трубки крепятся к теплообменнику конденсирующей частью вверх. Вода из системы водоснабжения протекает через коллектор и принимает тепло от конденсирующих частей.

Максимальная эксплуатационная температура нагревательных трубок это критическая температура двух-фазной жидкости, так как при ней не происходит более испарения или конденсации.

Нагревательная трубка обеспечивает также систему эффектом термодиода, таким образом в то время когда солнце не светит потери тепла сведены к минимуму. Это происходит потому, что потери происходят только через верхнюю часть коллектора, а не по всей

поверхности системы коллекторов. Верхняя часть коллекторов изолирована полиуретановой пеной до значения коэффициента теплопередачи 0,28-0,35 Вт/м К.

Внутри каждой конденсирующей части максимальная температура контролируется биметаллическим отсечным клапаном, настроенным на значение меньше критической температуры. Биметаллическая пластина клапана изменяет свою форму при достижении настроечных значений температуры. Это позволяет сконденсированную жидкость удерживать внутри конденсирующей части. Когда температура достигла настроечных значений клапан закрывается и жидкость изолируется внутри конденсатора, что предотвращает постоянное нагревание. При снижении температуры пластина разжимается и жидкость стекает в нижнюю часть трубок. Гибкая шейка системы поглощает термические и механические нагрузки.

ПЕРВОНАЧАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМЫ

Результаты эксплуатации показаны при помощи температур и состояния системы на Рисунке 4. Данные получены при помощи регулятора системы, обладающего функцией записи. Регулятор записывал данные каждые 10 минут и сохранял данные в течении двух лет, прежде чем происходило их обновление. Рисунок 4 показывает измеренную выходящую температуру коллектора, то есть температуру воды поступающей в систему водоснабжения (предположим постоянной температуры 50°C), температуры в линии слива и температуры наружного воздуха. Температура линии слива это суммарная температура воды поступающей из системы коллекторов и воды идущей мимо коллекторов. (Часть воды может не попадать в коллектор по причине производительности насосов коллектора). Температура окружающего воздуха в Филадельфии по докладу National Climatic Data Center также показана на Рисунке 4. Она была приблизительно 0F (-17,5°C) в течении всего дня. Наконец, Рисунок 4 показывает состояние системы: состояние 1 - насос работает, температура коллектора выше температуры системы водоснабжения (происходит перенагрев воды, а не предотвращение замерзания в коллекторах).

Температура коллектора падала ранним утром до значения 40C (в 6:00 часов). В это время включался насос и перекачивал воду для подогрева коллектора. Температура воды в коллекторе увеличивалась в результате такой вынужденной перекачки. Потери в результате такого перекачивания также отображены на Рисунке 4. в виде снижения температуры воды уходящая возвращается в бойлер для подогрева. Естественная циркуляция также в некоторой степени обогревает коллекторы.

Восход солнца отмечен в 7:21 утра. В 9 часов система коллекторов нагрелась до уровня включения насоса и начинается перенос тепла в систему водоснабжения. Утром насос включается несколько раз. В обед коллекторы подогревают систему водоснабжения постоянно. Вода попадает в бойлер имея температуру 56°C с 12:30 до 14:50.

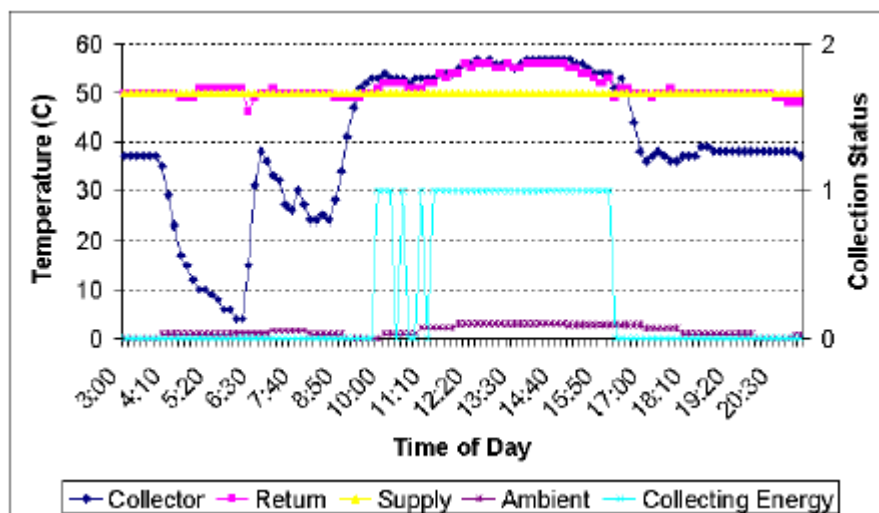


Рисунок 4. Температура коллектора, линии нагнетания и линии возврата, статус системы (1 = накопление энергии) в течении выбранного дня (10 января, 2004 года), показывающие характеристики системы.

СТОИМОСТЬ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ ПОДОГРЕВА ВОДЫ

Стоимость установки системы примерно 58000 долл. 50% этой суммы израсходованы на разработку и установку. 43% - покупка коллекторов и их установка. Оставшиеся 7% потратились на сантехнические соединения, насосы и регуляторы.

ПРЕДПОЛАГАЕМАЯ ЭКОНОМИЯ

В компьютерной программе предоставленная поставщиком коллекторов заложено ежегодное поглощение энергии в размере 151 ГДж/год при площади поглощения 36 м². Эта цифра не включает потери тепла через трубопроводы или связанные с предупреждением замерзания.

Для более точных данных были выполнены почасовые замеры данных. Полученная энергия подсчитана с учетом уравнения (2), incident angle modifier (взяты из паспорта устройства) и тепловых потерь (28Вт/°С) через изолированные медные трубки длиной 80м и диаметром 22см. Тепло, необходимое для поддержания температуры коллекторов 4°С (предупреждение замерзания) было подсчитано путем использования потерь тепла через трубопроводы и через верхнюю часть коллектора (коэффициент 0,35 Вт/м°С). Общая длина верхней части коллектора 30 м. Температура воды на входе в коллектор принята равной 50°С в течении всего года.

В моделирование была заложена типичная погода для Филадельфии. Результатом стал расчет данных, согласно которым насос будет работать 3 192 часа в году в режиме прокачки воды для предупреждения замерзания. для компенсации энергии (654 кВтчас/год).

Сокращения указанные в таблице 2:

I_c - солнечная энергия пришедшая на коллектор
 $Q_{collected}$ - ежегодная энергия накопленная коллектором
 $Q_{delivered}$ - тепло доставленное в систему с учетом потерь
 $Q_{freeze\ protection}$ - тепло необходимое для поддержания температуры в системе выше 4°C
эффективность системы

На Рисунке 5 показано помесечное изменение этих характеристик

Для определения ограничений системы используем простые формулы. Эффективность плоских коллекторов сильно зависит от окружающих условий. Однако в случае вакуумных коллекторов низкие тепловые потери делают достаточно эффективным использование простых формул при определении тепловых параметров.

Приблизительная энергия используемая для подогрева воды будет:

$$L = M * C * (T_{hot} - T_{cold}) + U_{loop} A_{loop} (T_{hot} - T_{indoor}), \quad (3)$$

где

L - дневная тепловая нагрузка (кВтчас/день),
 M - масса горячей воды, используемой за день (кг/день),
 C - удельная теплоемкость воды (0.001167 кВтчас/кг°C)
 T_{cold} - среднегодовая температура воды
 $U_{loop} A_{loop}$ - коэффициент теплопотерь системы
 T_{hot} - температура нагретой воды
 T_{indoor} - температура внутри здания

Стратегия определения ограничений при использовании этого метода основана на определении нагрузки при самых солнечных условиях.

$$A_c = L / (\eta_{solar} * I_{max}), \quad (4)$$

где

η_{solar} - эффективность солнечной системы
 I_{max} - максимальное дневное количество солнечного излучения в самый солнечный месяц. (кВтчас/м²/день).

Оценка ежегодного количества полученной энергии основана на среднегодовом дневном солнечном излучении I_{ave} (кВтчас/м²/день)

$$Q_{delivered} = A_c * I_{ave} * \eta_{solar} * (365 \text{ день/год}) \quad (5)$$

для Филадельфии и исследуемого здания данные будут следующими:

$M = 3562 \text{ кг/день}$
 $T_{hot} = 50^\circ\text{C}$
 $T_{cold} = 8,3^\circ\text{C}$

$$I_{\max} = 5,5 \text{ кВтчас/день}$$

$$I_{\text{ave}} = 4,6 \text{ кВтчас/день}$$

площадь системы 54 м^2

таким образом ежегодное количество полученной энергии, рассчитанное из уравнения (5) будет

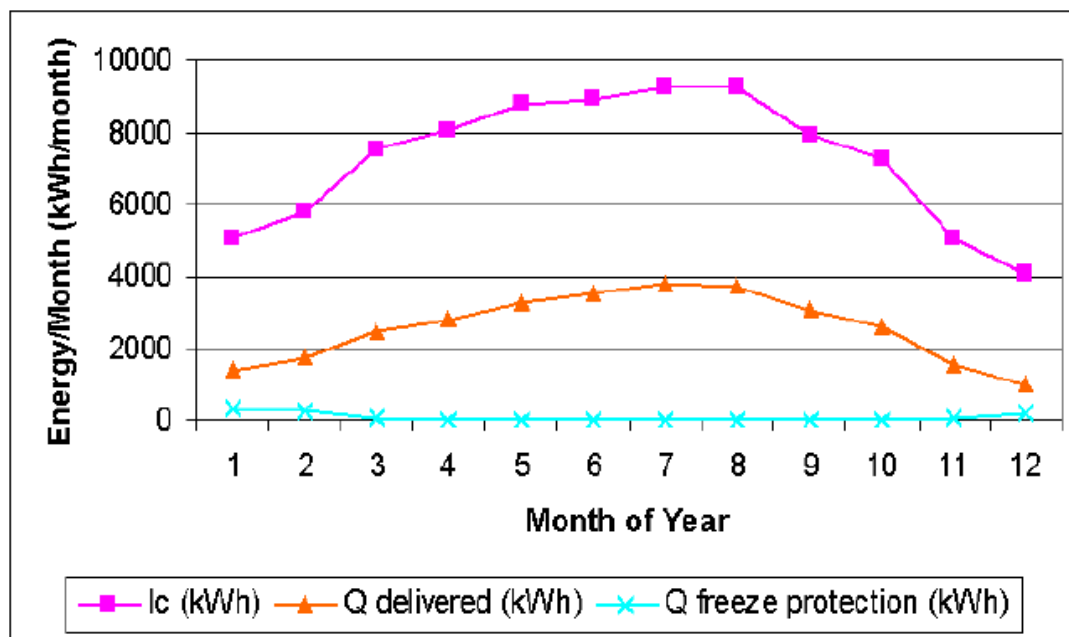
111 ГДж/год

То же самое значение мы получим, если будем использовать значение КПД системы 34%. (Примечание. КПД системы включает в себя потери тепла и потери связанные с предупреждением замерзания. Отличается от КПД коллектора, которое равно 41%).

Таблица 2. Результаты годового моделирования. Энергия попавшая на коллектор, Энергия накопленная коллектором, Энергия переданная в систему водоснабжения, потери на предупреждение замерзания.

I_c (GJ/year)	313
$Q_{\text{collected}}$ (GJ/year)	129
$Q_{\text{delivered}}$ (GJ/year)	111
$\eta_{\text{collector}}$	41%
$Q_{\text{freeze protection}}$ (GJ/year)	1.37
Pump energy (GJ/year)	2.35
η_{system}	34%

Рисунок 5. Смоделированное пришедшее количество энергии (Simulated incident solar energy), переданное количество энергии, энергия для предупреждения замерзания.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Этот отчет описывает солнечную систему подогрева воды, которая предполагает снижение стоимости затрат при ее внедрении в стандартную систему горячего водоснабжения коммерческих зданий. Работа системы основана на применении вакуумных солнечных коллекторов, хорошей теплоизоляции и систем контроля и защиты. Почасовое моделирование продемонстрировало КПД системы 34% (расчитанное на основе занимаемой коллектором площади). Эксперимент выполнялся в муниципальном здании в Филадельфии. Первичные наблюдения характеристик системы показали их соответствие расчетным и вода возвращающаяся в обратный контур на 5°C теплее чем на входе в солнечный коллектор. Участники проекта остались довольны относительно нетрудным внедрением системы и ее характеристиками. По итогам долгосрочных наблюдений будет сделана оценка работоспособности системы и ее экономности.