

ТЕПЛОПТЕРИ В СИСТЕМЕ СОЛНЕЧНОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

А. С. Снегирёвс^{1,2}, П. Я. Шипковс^{1,2}, Г. П. Кашкарова¹, Л. С. Мигла^{1,2},

¹ *Физико-энергетический институт, г. Рига, Латвия*

² *Рижский технический университет, г. Рига, Латвия*

В научном реферате описаны результаты исследований по определению зависимости производительности систем солнечного теплоснабжения от теплопотерь на отдельных участках данной системы в климатических условиях Балтийских стран.

Теплопотери в трубопроводе и аккумуляционном баке составляют более 30% от произведённого тепла в типичных системах солнечного теплоснабжения в климатических условиях Балтийских стран. Увеличение теплопотерь возникает, главным образом, при снижении температуры наружного воздуха. Среднегодовые показатели температур наружного воздуха в странах Балтийского региона ниже по сравнению с другими европейскими странами, где солнечные коллекторы являются более распространёнными. Это создаёт потребность в оптимизации систем солнечного теплоснабжения в Балтийских странах.

Для определения потерь тепла на отдельных участках систем солнечного теплоснабжения была использована программа динамического моделирования с реальными метеорологическими данными. Программа учитывает взаимное влияние отдельных частей системы теплоснабжения.

Метеорологические данные были собраны на "Испытательном полигоне использования солнечной энергии" в Физико-энергетическом институте Латвии. Метеорологические данные нескольких лет были обработаны и введены в программу моделирования. Сравнены результаты тестирования солнечных коллекторов в реальных условиях на испытательном полигоне с результатами моделирования программы. Результаты моделирования были обработаны и было получено несколько закономерностей.

Определена зависимость теплопотерь от коэффициента теплопроводности на отдельных участках систем солнечного теплоснабжения с учётом их влияния на производительность данной системы в климатических условиях Балтийских стран. Эта зависимость была определена для коэффициента теплопроводности солнечного коллектора, теплоизоляции трубопровода и теплоизоляции аккумуляционного бака.

Теплопотери снижают температуру теплоносителя, в свою очередь, эффективность некоторых элементов системы возрастает с понижением температуры теплоносителя. Таким образом, общий КПД систем солнечного теплоснабжения уменьшается нелинейно при увеличении теплопотерь.

Полученные закономерности позволяют более точно определить производительность систем солнечного теплоснабжения и энергосбережение на отдельных участках системы. Эти разработки могут быть использованы в дальнейших исследованиях для повышения эффективности систем солнечного теплоснабжения.

Введение

Средняя эффективность солнечной тепловой системы (СТС) с застеклёнными коллекторами плоского типа составляет 30 – 35% в климатических условиях Балтийских

стран. Солнечное излучение в Балтийских странах 1100 – 1190 кВт·ч/м² в год. Если используются вакуумные трубчатые солнечные коллектора, эффективность увеличивается до 35 – 40%, за счёт уменьшения теплотер коллектора.

Значительная часть абсорбируемой энергии солнечными коллекторами расходуется в виде теплотер солнечного коллектора, трубопровода и аккумуляционного бака.

Теплотери в основном зависят от разницы температур между наружным воздухом и абсорбером, или температурой внутреннего или наружного воздуха и теплоносителем.

Годовое глобальное солнечное излучение меньше в регионе Балтийских стран по сравнению с другими европейскими странами, где солнечные коллектора более распространены. И диапазон температур наружного воздуха соответственно ниже. Это создаёт необходимость оптимизации солнечных тепловых систем в климатических условиях Балтийских стран. Определение закономерностей для факторов, наиболее влияющих на производительность СТС, необходимо для оптимизации СТС. [3]

Производительность и теплотери типичных СТС в различных регионах Европы сравнены с использованием программы динамического моделирования. Результаты приравнены к 1 квадратному метру установленного коллектора.

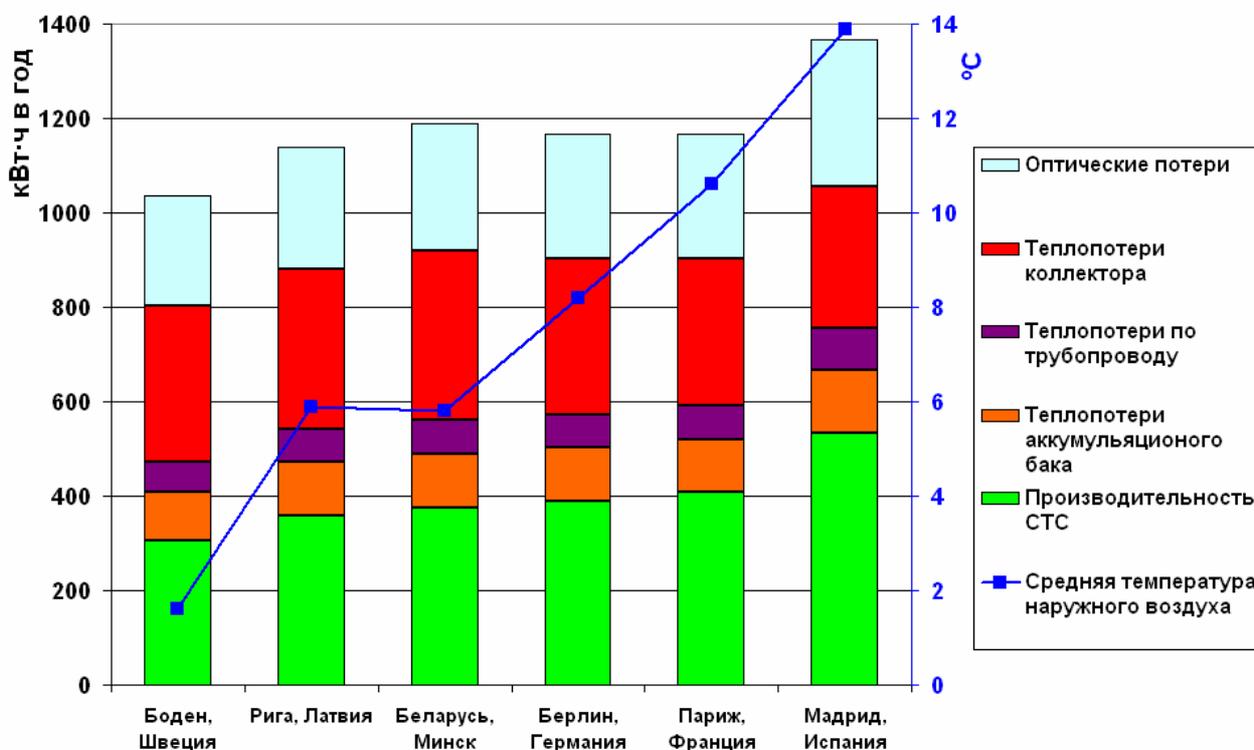


Рис. 1. Производительность СТС и теплотери на отдельных участках систем солнечного теплоснабжения в различных регионах.

Как показано на рис.1 теплотери солнечного коллектора в Балтийском регионе больше, чем в Берлине на 3%, чем в Париже на 9% и чем в Мадриде на 13%. Они больше даже при том, что время работы СТС в тёплых регионах больше. Теплотери солнечного коллектора в Белоруссии также велики. Закономерности теплотер и коэффициента теплопроводности на отдельных участках СТС в климатическом регионе балтийских стран отличаются от закономерностей в более тёплых европейских регионах.

Методология

Теплопотери на отдельных участках СТС изменяются с изменением погодных условий. А также происходит остывание теплоносителя в трубопроводе во время, когда циркуляционный насос останавливает циркуляцию теплоносителя. Для качественного расчёта влияния этих эффектов, необходимо использование программы динамического моделирования.

Программа «PolySun» была использована для определения зависимости конечной годовой производительности солнечных коллекторов и количества теплопотерь от коэффициента теплопроводности отдельных участков СТС. PolySun – программа динамического моделирования разработана специально для солнечных тепловых систем.

Метеорологические данные с «Испытательного полигона использования солнечной энергии» интегрированы в программу с почасовой частотой. Испытательный полигон использования солнечной энергии находится в Физико-энергетическом институте Латвии. Высокоточная измерительная аппаратура была использована для сбора метеорологических данных. Интенсивность солнечного излучения измерялась с помощью пиранометров SMP3 и SMP21. Температура наружного воздуха измерялась резистивным термометром PT100. Период сбора метеорологических данных – 4 года, с 2008 по 2011 год. Программа моделирования совместима с программой всемирных метеорологических данных Meteosun 1.0 с метеорологическими данными за 1995 год.

Производительность СТС ($Q_{СТС}$) равняется производительности солнечных коллекторов (Q_K) минус теплопотери на отдельных участках СТС и минус потреблённая энергия на работу циркуляционного насоса (Q_H):

$$Q_{СТС} = Q_K - T_T - T_A - Q_H \text{ [кВт}\cdot\text{ч]} \text{ [4]}$$

Где: T_T – теплопотери трубопровода (кВт·ч), T_A – теплопотери аккумуляционного бака (кВт·ч).

Теплопотери зависят от коэффициента теплопроводности и разницы температур между теплоносителем и окружающей средой или между абсорбером и наружным воздухом. Коэффициент теплопроводности постоянен для участков СТС, а разность температур меняется с изменением погодных условий.

Моментальная производительность солнечных коллекторов (q_k) рассчитывается из интенсивности солнечного излучения, которое падает на пластину абсорбера, минус тепловые потери в виде конвекции и тепло излучения корпуса солнечного коллектора:

$$q_k = G_a - T_k \text{ [Вт/м}^2\text{]} \text{ [1]}$$

Где G_a – доступное излучение (Вт/м²), и T_k показывает термические потери (Вт/м²).

Доступное солнечное излучение определяется математически, используя: излучения на солнечный коллектор, G ; степень прозрачности стекла, τ ; и степень поглощения абсорбера, α :

$$G_a = G \cdot \tau \cdot \alpha \text{ [Вт/м}^2\text{]} \text{ [1]}$$

Теплопотери солнечного коллектора зависят от разности температур абсорбера и наружного воздуха, $\Delta\theta$. Данная зависимость линейна при первой аппроксимации, для маленьких температур абсорбера, и рассчитывается с помощью коэффициента теплопотерь K_K (Вт/м²):

$$T_k = K_k \cdot \Delta\theta \text{ [Вт/м}^2\text{]}$$

При больших температурах абсорбера теплопотери возрастают не линейно при увеличении разности температур. Возрастание теплопотерь происходит стремительней за счёт увеличения теплоизлучения солнечного коллектора.^[1] Таким образом, у закономерности образуется изгиб и уравнения второй аппроксимации имеет вид:

$$T_k = c1 \cdot \Delta\theta + c2 \cdot \Delta\theta^2 \text{ [Вт/м}^2\text{]} \text{ [1]}$$

Где c_1 – линейный коэффициент теплопроводности коллектора ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$) и c_2 – квадратичный коэффициент теплопроводности коллектора ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^2)$).

Коэффициент теплопотерь трубопровода рассчитан с учётом: λ – теплопроводности изоляционного материала ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$); l – длины трубопровода (м); D – внешнего диаметра изолированного трубопровода (мм); d – внешнего диаметра неизолированной трубы (мм); и \ln – натуральный логарифм:

$$K_T = \frac{\lambda \cdot l}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} \quad [\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})] \quad [1]$$

Аккумуляционные баки в большинстве случаев имеют цилиндрическую форму. Поэтому расчёт коэффициента теплопотерь аккумуляционного бака похож на расчёт трубопровода плюс теплопроводность верхней и нижней частей аккумуляционного бака:

$$K_A = \frac{\lambda \cdot l}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} + 2 \cdot \lambda \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad [\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})]$$

Где π – математическая константа (≈ 3.14).

Средние параметры СТС введены в программу динамического моделирования. Средние параметры 40 различных вакуумных трубчатых и 85 плоских солнечных коллекторов использовались в программе.

Номинальные параметры СТС в программе: углы наклона солнечных коллекторов 60° и 45° от горизонтальной поверхности; η_0 , оптическая эффективность солнечных коллекторов 0,77; c_1 , линейный коэффициент теплопотерь солнечного коллектора 3,5 (для плоского типа) и 1,25 (для вакуумного трубчатого типа) ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$); c_2 , квадратичный коэффициент теплопотерь солнечного коллектора 0,015 ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^2)$); объём аккумуляционного бака 0.1 м^3 на каждый квадратный метр солнечного коллектора; K_T , теплопроводность трубопровода $0,28 \text{ Вт}/\text{К}$ на каждый квадратный метр солнечного коллектора; K_A , теплопроводность аккумуляционного бака $0,47 \text{ Вт}/\text{К}$ на каждый квадратный метр солнечного коллектора; потребление горячей воды 30 – 50 литров на каждый квадратный метр солнечного коллектора. Некоторые параметры систематически изменялись для определения их влияния на производительность СТС и на теплопотери.

Большое количество результатов динамического моделирования анализировалось с помощью программ табличного расчёта.

Результаты и дискуссия

Теплопотери солнечного коллектора

Самые большие теплопотери СТС исходят из солнечных коллекторов. Необходимо определить зависимость между производительностью солнечных коллекторов и коэффициентами солнечного коллектора η_0 , c_1 и c_2 для каждого конкретного региона.^[1] Для определения реальной производительности солнечных коллекторов необходимо определить эту зависимость с учётом работы солнечных коллекторов в целой СТС. После определения данной закономерности характеристики η_0 , c_1 и c_2 возможно использовать, как критерии для сравнения качества различных солнечных коллекторов.

Параметр солнечного коллектора c_1 изменялся в программе моделирования для определения зависимости между линейным коэффициентом теплопроводности и производительностью солнечного коллектора. Теплопотери увеличиваются с увеличением количества абсорбируемой энергии. Оптическая эффективность солнечного коллектора η_0

показывает абсорбирующую способность солнечного коллектора, которая состоит из прозрачности стекла и из степени поглощения абсорбируемой поверхности. Поэтому η_0 изменялся для нахождения подобных закономерностей солнечных коллекторов с различной оптической эффективностью.

Минимальные значения степени поглощения солнечного коллектора примерно 0,55 для вакуумных солнечных коллекторов с толстым стеклом, и максимальные значения близки к 0,93 для незастеклённых солнечных коллекторов с высокоселективным покрытием. Среднее η_0 близко к 0,75. Поэтому степень поглощения рассматривалась в пределах от 0,5 до 0,95.

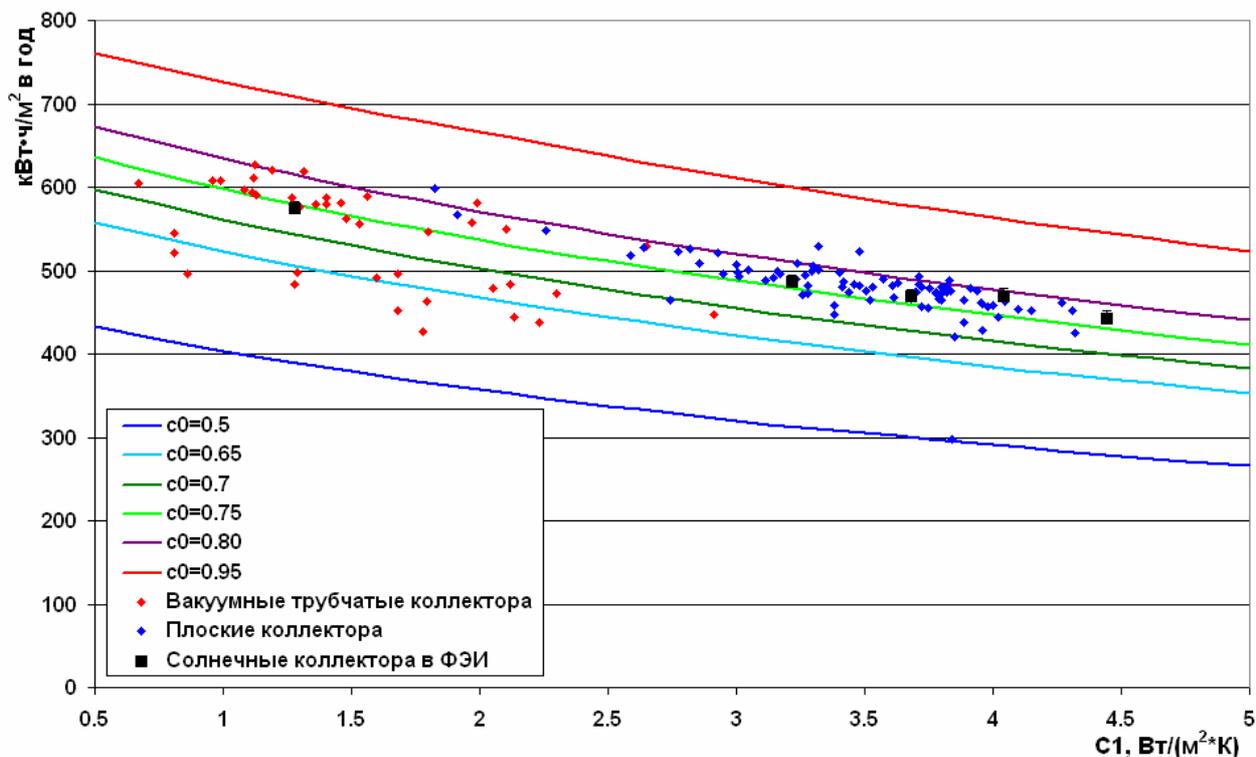


Рис. 2. закономерность между c_1 и производительностью солнечных коллекторов, учитывая η_0 .

Результаты симулирования СТС с различными η_0 и c_1 коэффициентами солнечного коллектора изображены на рис.2. Чтобы было легче понять, результаты с одинаковой оптической эффективностью соединены линиями.

Результаты симуляций с различного типа реально существующими солнечными коллекторами также изображены на рис.2. Это реально существующие и распространённые в мире солнечные коллекторы с сертификатом тестирования от SolarKeymark. Результаты показывают, что производительность солнечных коллекторов плоского типа находится в диапазоне от 420 до 530 кВт·ч/м² в год, и вакуумного трубчатого типа – в диапазоне от 450 до 610 кВт·ч/м² в год.

Из рис.2 видно, что значения линейного коэффициента теплопроводности c_1 в большинстве случаев находятся в диапазоне от 0,8 до 2,4 В/(м²·К) для вакуумных трубчатых коллекторов и в диапазоне от 2,6 до 4,3 В/(м²·К) для плоских солнечных коллекторов.

Дисперсия оптической эффективности η_0 вакуумных трубчатых солнечных коллекторов больше, чем дисперсия η_0 плоских солнечных коллекторов. Возможно, производители вакуумных трубчатых солнечных коллекторов уделяют больше внимания теплопроводности, нежели оптической эффективности солнечных коллекторов. Результаты на рис.2 показывают, что оба параметра имеют относительно большое влияние на производительность солнечных коллекторов.

Результаты тестирования солнечных коллекторов на "Испытательном полигоне использования солнечной энергии" также изображены на рис.2 точками чёрного цвета. Данные солнечные коллектора тестировались в реальных метеорологических условиях. Некоторые номинальные параметры СТС на испытательном полигоне отличаются от номинальных параметров в программе моделирования. Поэтому производительность тепло – энергии солнечных коллекторов на испытательном полигоне на 1,8% ниже, чем в программе моделирования.

Результаты тестирования на испытательном полигоне показывают, что повышение температуры абсорбера выше 100°C происходит редко в типичных СТС с плоскими коллекторами в климатических условиях Балтийского региона. Поэтому расхождения квадратичного коэффициента теплопроводности солнечных коллекторов меньше влияют на производительность солнечного коллектора плоского типа, чем линейный коэффициент теплопроводности.

В основном, у солнечных коллекторов c_2 находится в пределах от 0,0025 до 0,02 $В/(м^2 \cdot К^2)$.

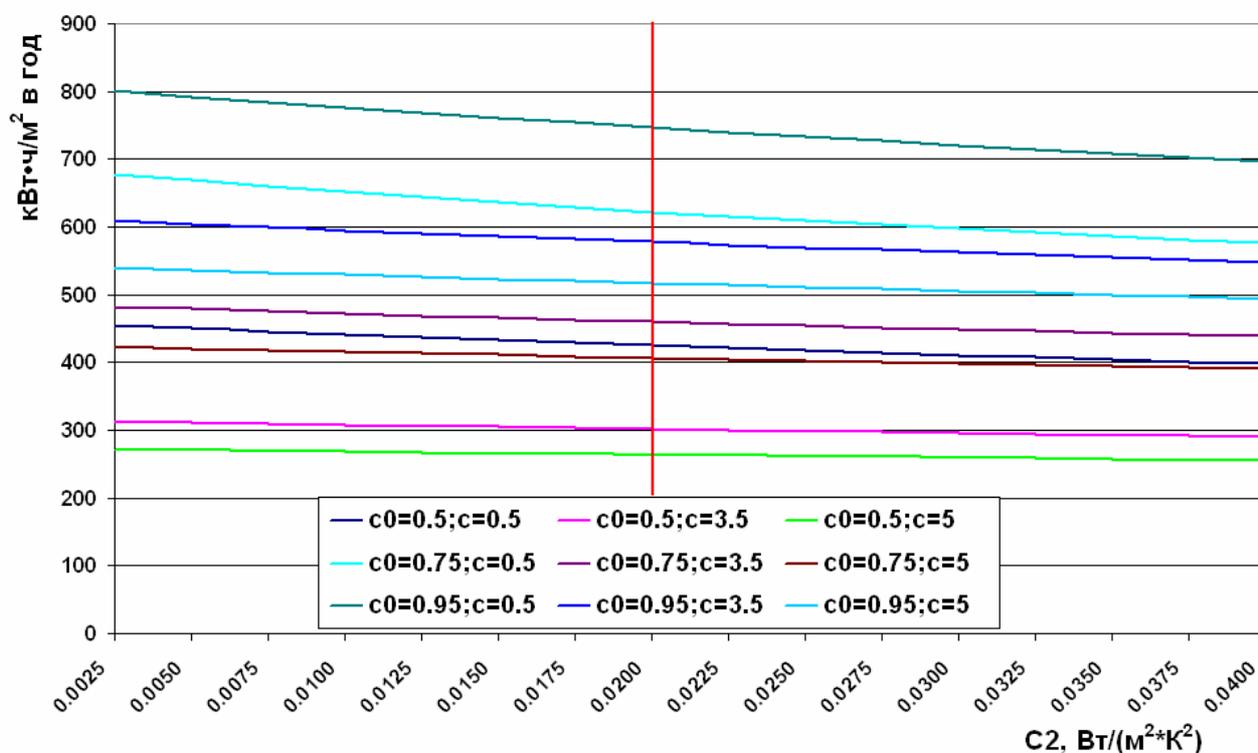


Рис. 3. зависимость между c_2 и производительностью солнечного коллектора в различных η_0 и c_1 комбинациях.

Влияние квадратичного коэффициента теплопроводности возрастает с увеличением оптической эффективности и с уменьшением линейного коэффициента теплопроводности. Из диаграммы на рис 3 следует, что c_2 может снизить производительность от 1,4 до 4,9 % для распространённых типов солнечных коллекторов при c_2 в диапазоне от 0,0025 до 0,2 $В/(м^2 \cdot К^2)$.

Теплопотери трубопровода

Длина и изоляция трубопровода в контуре солнечного коллектора весьма разнообразны в различных СТС. На это влияют: расстояние между солнечными коллекторами и аккумуляционным баком, тип и форма здания, количество солнечных коллекторов и т.д. В программе моделирования длина, диаметр и изоляция одинаковы для

внутреннего и наружного участков трубопровода. Поэтому результаты моделирования отражают средние значения теплотерь внутреннего и наружного трубопроводов. Теплотери увеличиваются с увеличением проводимой тепло энергии по трубам контура солнечных коллекторов. Проводимое количество тепло энергии по трубопроводу зависит от производительности солнечных коллекторов и от теплотерь на различных участках СТС. Поэтому необходимо определить влияние производительности солнечных коллекторов на теплотери трубопровода.

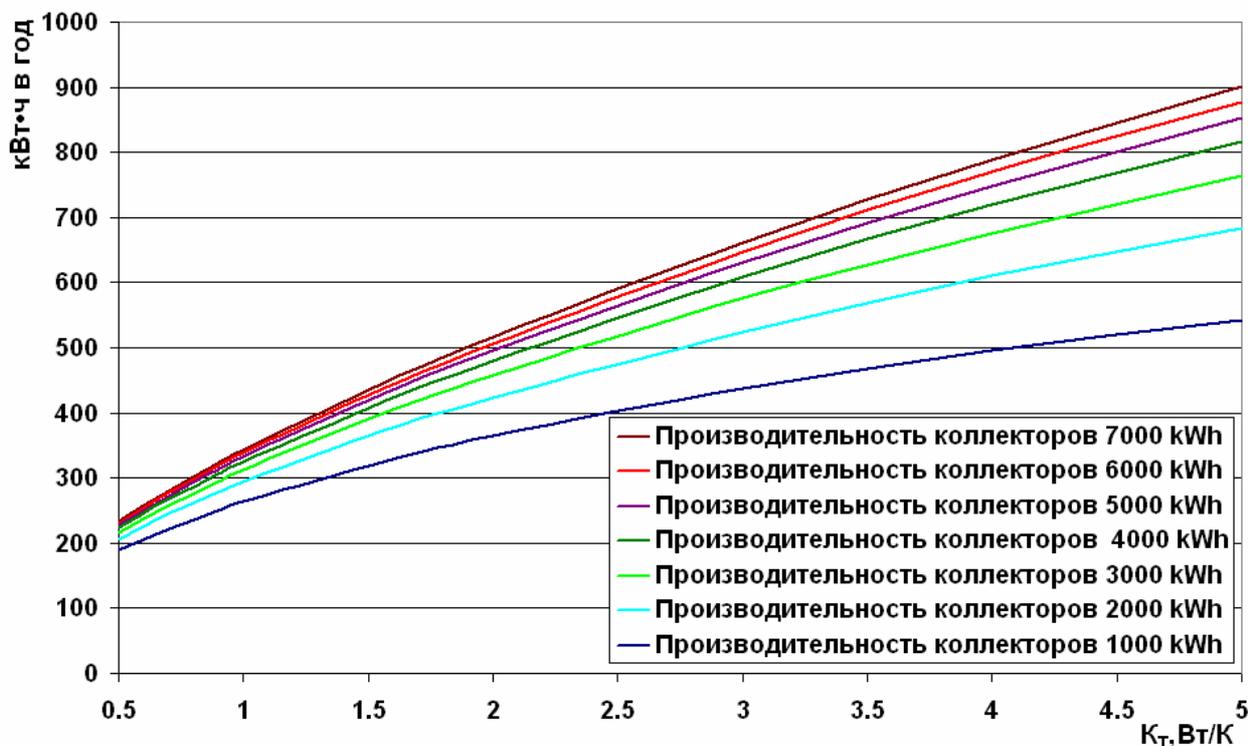


Рис. 4. Зависимость теплотерь и коэффициента теплопроводности трубопровода, для различной общей производительности солнечных коллекторов.

Теплотери трубопровода составляют примерно 30 – 75 кВт·ч на каждый установленный квадратный метр солнечного коллектора типичных СТС. Улучшение теплоизоляции может повлиять до 9% на конечную производительность СТС.

Теплотери аккумуляционного бака

Теплотери аккумуляционного бака зависят от произведённой энергии солнечными коллекторами, от приведённой энергии дополнительным источником тепла, от площади поверхности бака, от типа и толщины изоляции, и от потребления горячей воды.

Дополнительный источник тепла нагревает только верхнюю часть бака. Температурное распределение, таким образом, уменьшает теплотери аккумуляционного бака и ускоряет приготовление горячей воды дополнительным нагревателем. Теплотери нижних уровней аккумуляционного бака возникают за счёт производительности теплоэнергии солнечными коллекторами. Программа динамического моделирования учитывает температурное распределение на 12 слоёв по высоте аккумуляционного бака.

Проведены симуляции СТС с аккумуляционными баками различного типа для определения закономерности между коэффициентом теплопроводности и теплотерь аккумуляционных баков.

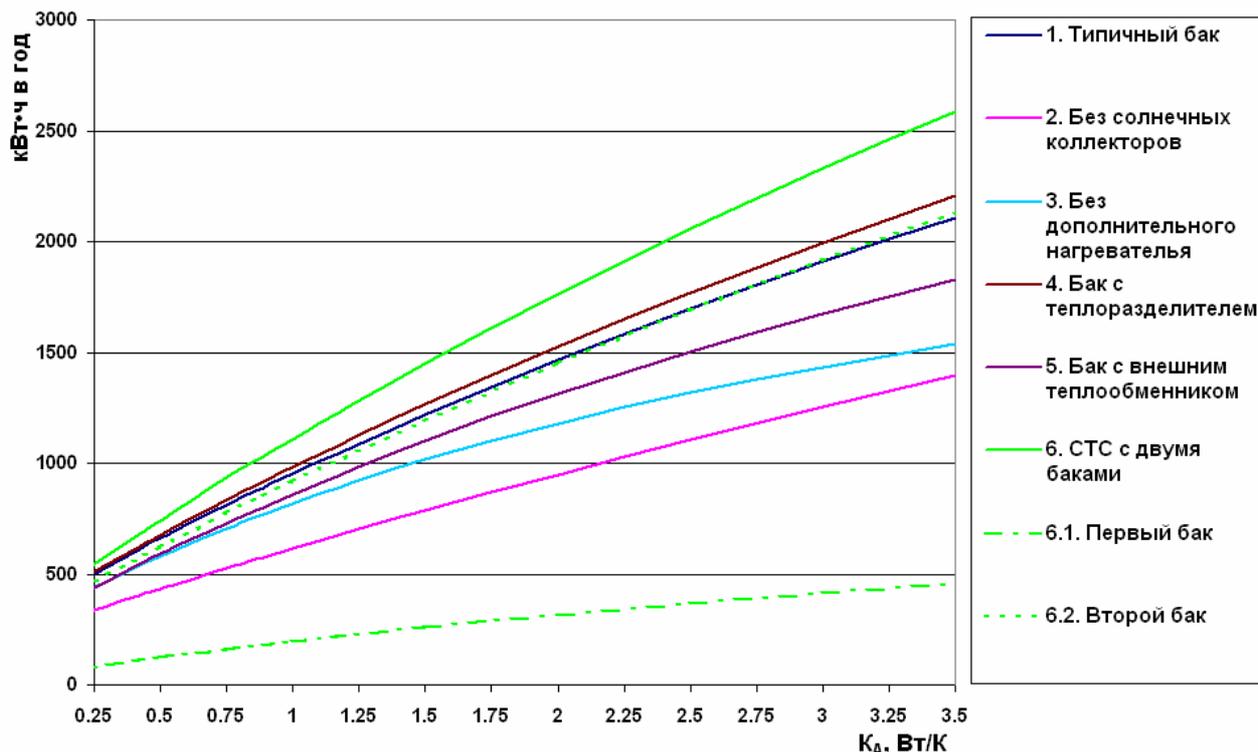


Рис. 5. Закономерность коэффициента теплопроводности и теплотерь аккумуляционных баков различного типа.

Рис.5 показывает, что теплотери аккумуляционного бака в системе без солнечных коллекторов составляет 64 – 67% от теплотерь бака в типичной СТС. Теплотери аккумуляционного бака с внешним теплообменником меньше в сравнении с типичным баком. Но в таком случае появляются дополнительные потери тепла от теплообменника сразу в помещении. Теплотери бака с тепло разделителем немного увеличены по сравнению с теплотерями типичного бака, в пределах от 2 до 5 %. Самые большие теплотери аккумуляционного бака в системе с двумя баками. Это происходит за счёт увеличенной общей площади поверхности баков с одинаковой теплоизоляцией. Разница теплотерь аккумуляционных баков различного типа составляет до 26% от конечной производительности СТС.

Распределение теплотерь в течение года

Производительность СТС меняется в течение года. В холодные месяца, как продолжительность сияния солнца, так и интенсивность солнечного излучения меньше. Это уменьшает рабочие часы СТС. Средняя температура наружного воздуха меньше в холодные месяца, это увеличивает теплотери.

Определены производительность СТС и теплотери на отдельных участках СТС по месяцам с помощью программы динамического моделирования и с метеорологическими данными за 1995 год.

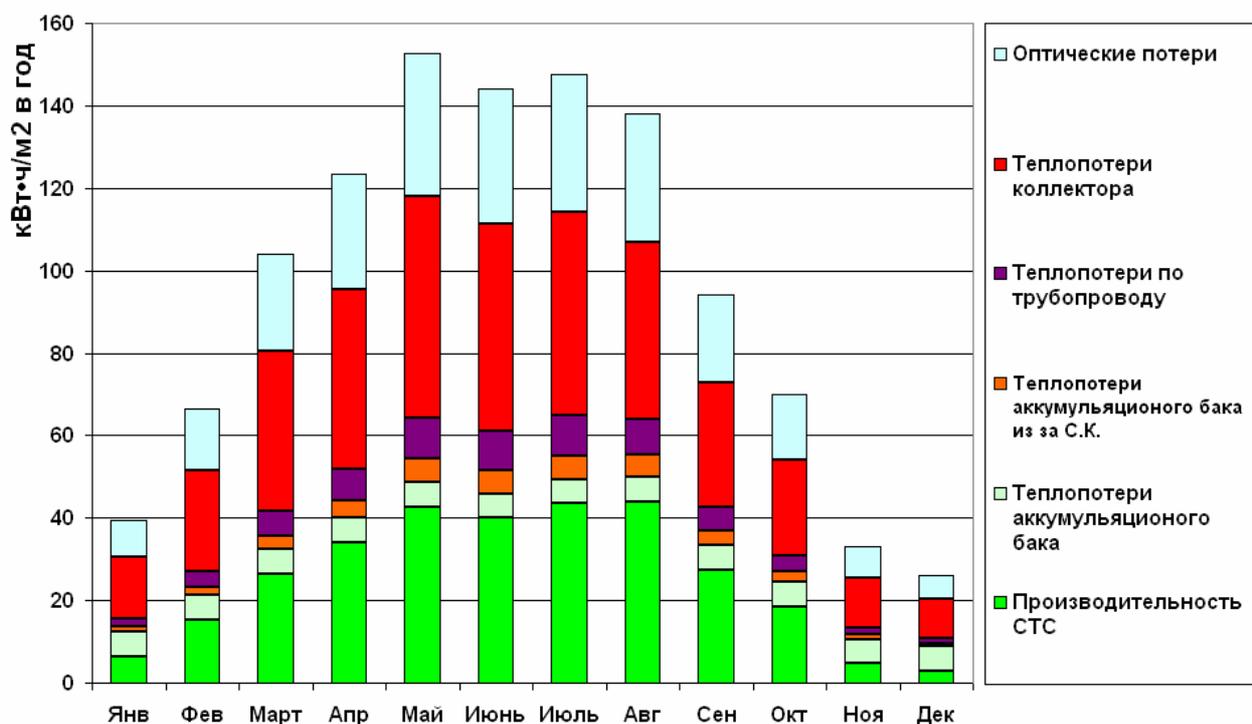


Рис. 6. Сравнения производительности СТС и теплопотерь по месяцам.

Результаты симулирования на рис. 6 показывают, что производительность СТС в зимнее время составляет примерно 8% от годовой производительности в условиях Балтийского климата. Производительность СТС весной в 2 раза больше, чем осенью. Производительность СТС с мая по август самая большая и в течение 4 месяцев составляет 56% от годовой производительности СТС. Солнечная интенсивность в мае больше чем в августе, а температура окружающей среды наоборот. Общий результат даёт одинаковую конечную производительность СТС, так как при пониженной температуре увеличиваются теплопотери солнечного коллектора и наружного трубопровода.

Теплопотери аккумуляторного бака летом в 1,7 раз больше, чем зимой. Зимой, в основном, работает дополнительный тепловой источник. Летом в средней и нижней части бака повышается температура из – за активной производительности солнечных коллекторов, а также происходит перенагревание бака выше температуры подачи горячей воды.

Теплопотери трубопровода в контуре солнечных коллекторов составляют 4,5 – 8% от количества солнечного излучения в различные месяцы. В СТС происходит дополнительное охлаждение в начале работы циркуляционного насоса, когда остывший теплоноситель из трубопровода проходит через теплообменник аккумуляторного бака. Этот процесс значительно влияет на производительность СТС в зимнее время.

Заключение

Теплопотери в СТС в Балтийском регионе больше по сравнению с другими Европейскими странами, где использование солнечных коллекторов более распространено.

Определена производительность солнечных коллекторов от η_0 оптической эффективности солнечных коллекторов, c_1 линейного и c_2 квадратичного коэффициента теплопроводности солнечных коллекторов для региона Балтийских стран. Это даёт возможность сравнивать качество различных коллекторов в климатических условиях Балтийских стран, используя характеристики η_0 , c_1 и c_2 .

Годовая производительность солнечных коллекторов плоского типа составляет 420 – 530 кВт·ч/м², и 450 – 610 кВт·ч вакуумного трубчатого типа.

Определена закономерность теплотерь от коэффициента теплопроводности трубопровода в контуре солнечных коллекторов при различных общих производительностях солнечных коллекторов в климатических условиях Балтийских стран. Коэффициент теплопроводности трубопровода может изменять до 9% конечную производительность СТС.

Определена закономерность теплотерь от коэффициента теплопроводности аккумуляторного бака. Разница между теплотерями аккумуляторных баков различного типа достигает 26% от конечной производительности СТС.

Благодарности

Эта работа выполнена при содействии Европейского социального фонда в рамках проекта «Поддержка развития докторантуры РТУ».

Литература

1. Planning and Installing Solar Thermal Systems, United Kingdom: James & James, 2005. 300 p.
2. Shipkovs P., Kashkarova G., Lebedeva K., Solar Collectors Operation Methods Effect on System Efficiency. ISESCO Science and Technology Vision, May 2011, Vol.7, No. 11, pp. 38-42
3. Weiss W. Solar heating system for houses, A design handbook for solar combisystems. – James & James, 2003. 310 p.