

УДК 662/997:697.1

К ВОПРОСУ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ГЕЛИОСИСТЕМ С ПЛОСКИМИ КОЛЛЕКТОРАМИ ДЛЯ ДОМОВ УСАДЕБНОГО ТИПА

Акад. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. ХРУСТАЛЕВ Б. М.,
канд. техн. наук, доц. ПОКОТИЛОВ В. В.,
аспиранты РУТКОВСКИЙ М. А., НГУЕН Тху Нга

*Белорусский национальный технический университет,
Научный энергетический институт Вьетнамской академии наук и технологий*

Использование возобновляемых источников энергии для домов усадебного типа способствует улучшению экологической обстановки и снижению потребления традиционных энергоресурсов [1, 2]. Наиболее рациональными являются технологии совмещения различных видов возобновляемых источников, например биогазовой и гелиосистемы [2]. На рис. 1 показана схема распределения потоков энергии в технологическом процессе получения биогаза для его использования в энергоснабжении дома усадебного типа.

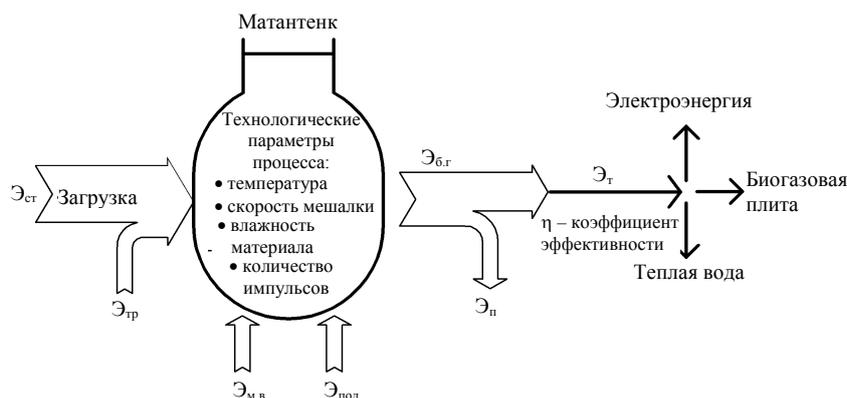


Рис. 1. Схема распределения потоков энергии в технологическом процессе получения биогаза: $\mathcal{E}_{ст}$ – потенциал энергии сточных вод; $\mathcal{E}_{тр}$ – расход энергии транспорта биомассы; $\mathcal{E}_{м.в}$ – то же механических возмущений; $\mathcal{E}_{под}$ – то же на подогрев биомассы; $\mathcal{E}_{б.г}$ – энергия биогаза; $\mathcal{E}_{п}$ – энергия, потребляемая на собственные нужды; $\mathcal{E}_{т}$ – энергия товарного биогаза

В домах усадебного типа солнечная тепловая энергия может использоваться на нужды горячего водоснабжения и отопления. Экономически це-

лесообразными для отопления дома являются технологии солнечной архитектуры, а для горячего водоснабжения – технологии водонагревательных гелиосистем. Традиционное решение [3–8] в виде принципиальной схемы гелиосистемы горячего водоснабжения дома усадебного типа показано на рис. 2. Эффективность гелиосистемы принято оценивать по эффективности работы гелиоколлектора (рис. 2)

$$\frac{q_{\text{п}}}{q_{\text{с}}} = f\left(\frac{(t_{\text{к}} + t_{\text{в}})/2 - t_{\text{н}}}{q_{\text{с}}}\right), \quad (1)$$

где $q_{\text{п}}$ – теплопроизводительность коллектора, приведенная на 1 м^2 его площади, $\text{Вт}/\text{м}^2$; $q_{\text{с}}$ – интенсивность падающего солнечного излучения в площади коллектора, $\text{Вт}/\text{м}^2$; $t_{\text{н}}$ – температура окружающего гелиоколлектор «наружного» воздуха, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{в}}$ – то же теплоносителя на входе в гелиоколлектор, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{к}}$ – то же на выходе из гелиоколлектора, $^{\circ}\text{C}$.

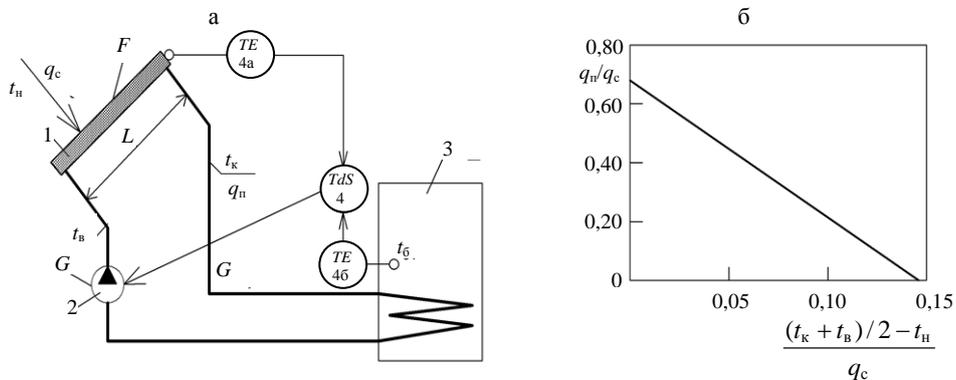


Рис. 2. а – принципиальная схема гелиосистемы горячего водоснабжения [3–8]: 1 – плоский гелиоколлектор; 2 – циркуляционный насос с постоянной скоростью вращения ротора; 3 – бак-аккумулятор; 4 – двухпозиционный регулятор перепада температуры; 4а, 4б – датчики температуры соответственно на выходе из гелиоколлектора и в баке-аккумуляторе; б – график эффективности гелиоколлектора

Зависимость (1) выявляется эмпирически при стационарных тепловых условиях и постоянном расходе теплоносителя G , $\text{кг}/\text{ч}$. При тестовых испытаниях коллектора варьируемыми являются значения величин $q_{\text{с}}$, $\text{Вт}/\text{м}^2$; $t_{\text{н}}$, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{в}}$, $^{\circ}\text{C}$.

Особенности эксплуатации гелиосистемы обусловлены двухпозиционным характером автоматической работы циркуляционного насоса 2, поэтому за определенный период работы реальная эффективность гелиосистемы значительно меньше «моментальной» (1). Снижению эффективности гелиосистемы способствуют множество причин [4, 5, 8, 9], но наиболее значимая из них, по нашему мнению, заключается в неизменности расхода $G = \text{const}$ при различной интенсивности солнечного излучения.

Расчетная производительность насоса $G = \text{const}$ проектируется, как правило, на расчетную тепловую мощность гелиосистемы при номинальном значении $q_{\text{с}}$ [4, 6, 7]. В этом случае расчетное распределение температуры по ходу движения L , м, теплоносителя в коллекторе принимается линейным (кривая 1, рис. 3в), в качестве расчетной – средняя температура между расчетными температурами выхода и входа теплоносителя $(t_{\text{к}} + t_{\text{в}})/2$.

Под воздействием реальной, отличной от расчетной, интенсивности q_c ($G = \text{const}$) распределение температуры по ходу движения L теплоносителя не является линейным (кривые 2 и 3, рис. 3в) [4, б, 7].

При максимальной интенсивности излучения теплоноситель приобретает максимальную температуру $t_{к2}$, пройдя лишь часть пути до выхода из коллектора (кривая 2, рис. 3в). Здесь явно не используется возможность повышения тепловой мощности коллектора, для чего следует увеличить расход теплоносителя, чтобы обеспечить $G_2 > (G = \text{const})$.

При малой интенсивности излучения теплоноситель имеет минимальную температуру $t_{к3}$ (кривая 3, рис. 3в), поэтому насос включается на короткий промежуток времени и автоматически выключается на продолжительный период. Для повышения температуры $t_{к3}$ и увеличения периода работы насоса следует уменьшить расход теплоносителя: $G_3 < (G = \text{const})$.

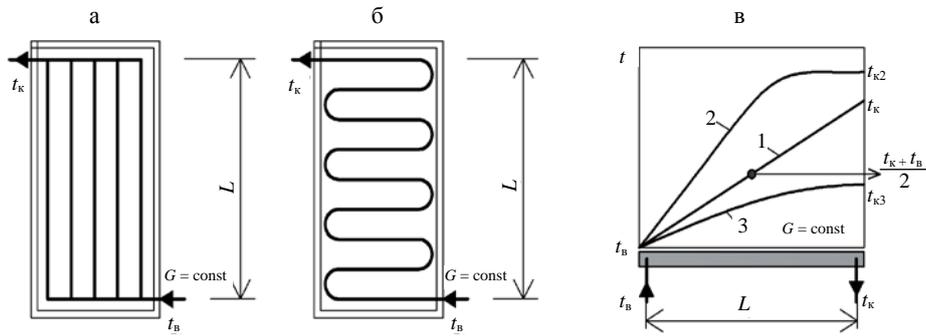


Рис. 3. Схемы гелиоколлекторов и характер распределения температуры теплоносителя при различной интенсивности солнечного излучения в плоскости коллектора [4–6]: 1 – расчетная зависимость при номинальной (расчетной) интенсивности солнечного излучения q_c ; 2 – экспериментальная зависимость при максимальной интенсивности излучения q_c ; 3 – то же при малой интенсивности излучения q_c

Нелинейный характер распределения температуры (кривая 3) характерен для коллектора с параллельным соединением нагревательных элементов (рис. 3а). Мы считаем это следствием неодинакового распределения расходов теплоносителя по параллельным соединениям из-за влияния дополнительного естественного гравитационного циркуляционного давления. Аналогичное явление наблюдается при параллельном соединении гелиоколлекторов (рис. 4б), что также можно объяснить влиянием гравитационного циркуляционного давления.

Процесс передачи тепловой энергии от солнечного излучения к циркулирующему в гелиосистеме теплоносителю состоит из последовательно взаимосвязанных процессов: лучистого теплообмена на внешней поверхности нагреваемого элемента, кондуктивного теплообмена в тепловых элементах гелиоколлектора, конвективного теплообмена на внутренней поверхности нагреваемого элемента и теплопередачи от гелиоколлектора к окружающей среде.

Для оценки взаимосвязанных процессов теплообмена воспользуемся теорией подобия для выявления определяющих безразмерных комплексов [9–13]. Ввиду сложности математического описания происходящих процессов используем метод размерностей. В исследованиях воздушных ге-

лиосистем с естественной циркуляцией мы показали приемлемость данного подхода к решению подобных сложных задач [9, 13]. При насосной циркуляции схема выбора независимых переменных представлена на рис. 4. Выявляем следующий список размерных величин:

$$q_{\text{п}} = f(q_c, \theta_{\text{н}}, \theta_{\text{к}}, G/(F\rho), \nu, \rho, L), \quad (2)$$

где $\theta_{\text{н}} = (t_{\text{к}} + t_{\text{в}})/2 - t_{\text{н}}$ – разность между средней температурой теплоносителя в коллекторе и температурой окружающего воздуха, °С; $\theta_{\text{к}} = t_{\text{к}} - t_{\text{в}}$ – разность температур теплоносителя на выходе из коллектора и на входе в коллектор, °С; G – расход теплоносителя через гелиоколлектор, кг/с; F – площадь гелиоколлектора, м²; ν – кинематическая вязкость воды, принимаемая по средней температуре теплоносителя в гелиоколлекторе, м²/с; ρ – плотность воды, принимаемая по средней температуре теплоносителя в гелиоколлекторе, кг/м³; L – размер гелиоколлектора в направлении движения теплоносителя, м.

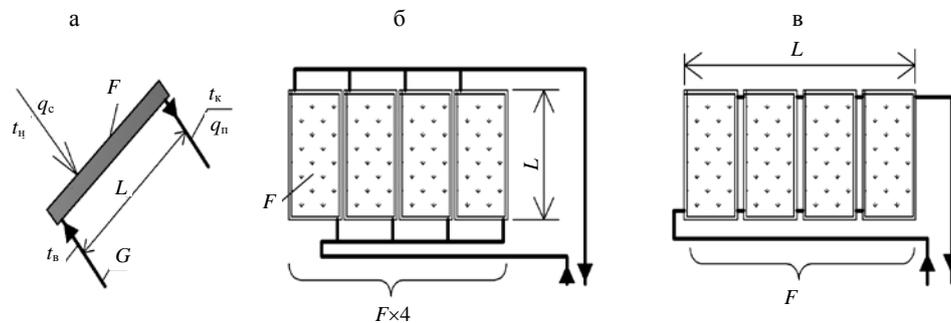


Рис. 4. Схема выбора независимых переменных (а), характеризующих процессы теплообмена в насосной гелиосистеме горячего водоснабжения при параллельном (б) и последовательном (в) присоединениях гелиоколлекторов

В (2) величинами, имеющими независимую размерность, являются q_c , $\theta_{\text{н}}$, ν , L . Анализ размерностей производных величин позволяет составить следующую критериальную зависимость:

$$\frac{q_{\text{п}}}{q_c} = f\left(\frac{\theta_{\text{к}}}{\theta_{\text{н}}}, \frac{(G/F)^2 \nu}{q_c L^2}\right) = f(A). \quad (3)$$

Зависимость (3) в отличие от (1) учитывает влияние расхода теплоносителя и содержит в себе задаваемое условие равномерности распределения температуры теплоносителя в направлении его движения, поэтому может служить основанием для построения методики расчета и проектирования гелиосистем с насосной циркуляцией теплоносителя. В сравнении с (1) зависимость (3) включает в себя дополнительные параметры и является общей для всех типоразмеров коллекторов. Константы для (3) могут быть получены экспериментально.

Были проведены предварительные исследования с использованием плоского гелиоколлектора. Схема экспериментальной установки и общий вид представлены на рис. 5 и 6.

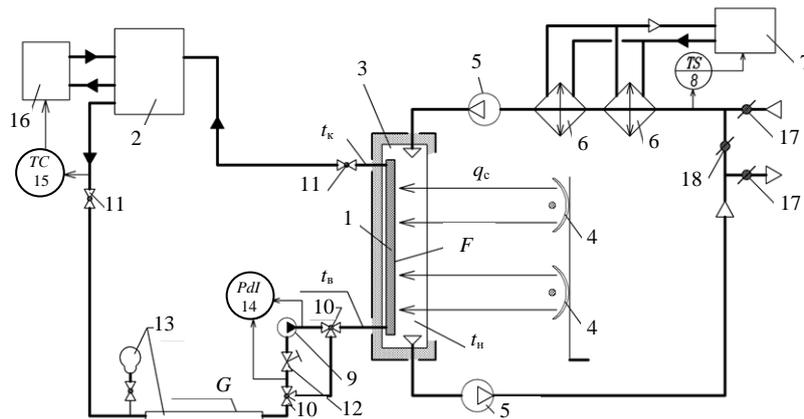


Рис. 5. Схема лабораторной установки: 1 – плоский гелиоколлектор; 2 – бак-аккумулятор; 3 – термостатическая камера; 4 – галогенные лампы; 5 – вентилятор; 6 – воздухоохладитель; 7 – холодильная установка; 8 – регулятор температуры в термостатической камере; 9 – насос циркуляционный; 10 – трехходовой переключающий клапан; 11 – запорный клапан; 13 – расходомер в виде стеклянного трубопровода; 14 – дифманометр показывающий; 15 – регулятор температуры пропорциональный; 16 – водоохладитель; 17 – воздушная заслонка (в закрытом положении); 18 – воздушная заслонка на байпасе (в открытом положении)

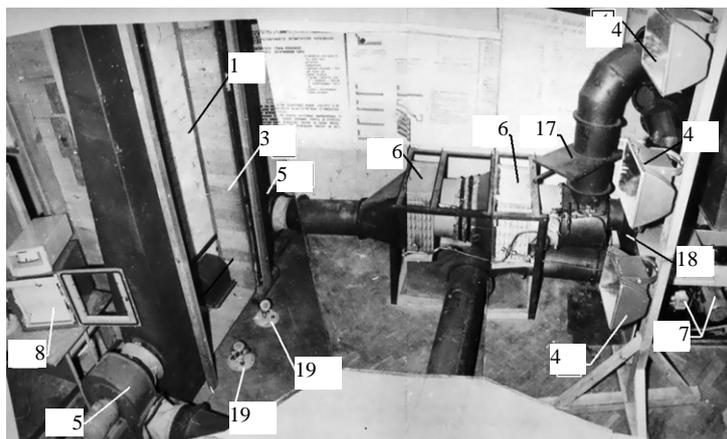


Рис. 6. Общий вид экспериментальной установки: 1 – плоский гелиоколлектор; 3 – термостатическая камера; 4 – галогенные тепловые излучатели; 5 – вентилятор; 6 – воздухоохладитель; 7 – холодильная установка; 8 – регулятор температуры в термостатической камере; 17 – воздушная заслонка (в закрытом положении); 18 – воздушная заслонка на байпасе (в открытом положении); 19 – датчик пиранометра

Исследования проводились в два этапа.

Первый этап исследований имел целью выявление характера влияния естественного циркуляционного давления на распределение расхода теплоносителя по параллельным соединениям в зависимости от направления теплоносителя «сверху вниз» или «снизу вверх». Эксперименты проводились при стационарных условиях теплообмена. В эксперименте был использован гелиоколлектор, разработанный в Белорусском аграрном техническом университете. Он состоит из верхней и нижней металлических гребенок, соединенных между собой полимерными гибкими трубками черного цвета, являющимися теплоприемниками солнечного излучения. Гелиоколлектор имеет гидравлическую схему параллельных соединений элементов (рис. 3а) с небольшой скоростью течения в каждом из них. Кор-

пус гелиоколлектора имеет одинарное остекление и теплоизоляцию с тыльной стороны с отражающей подложкой. В коллекторах подобного типа влияние естественного циркуляционного давления на гидравлический режим насосной циркуляции будет иметь наиболее выраженный характер. Измерялись температуры в пяти точках по длине каждого элемента гелиоколлектора. Термопары крепились с тыльной стороны каждого элемента с помощью крепежного скотча. С внешней от термопары стороны устанавливался экран из отражающего скотча с целью исключения влияния теплового излучения на результаты измерения. Схема эксперимента и результаты исследования приведены на рис. 7.

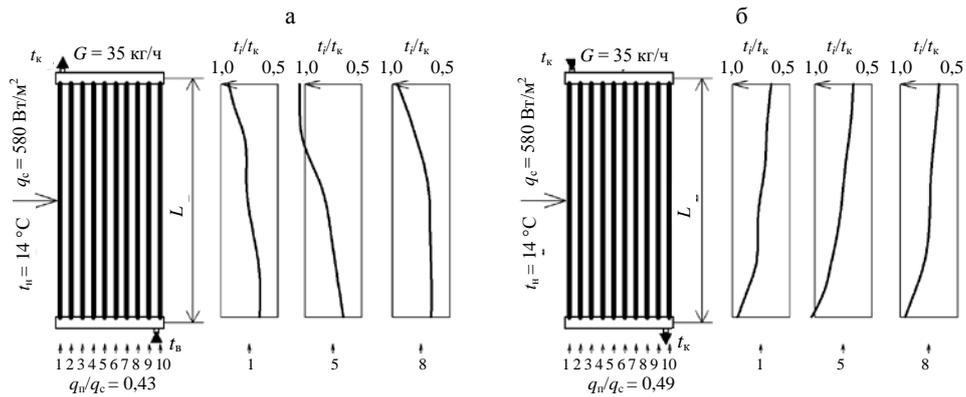


Рис. 7. Результаты экспериментального исследования по выявлению характера распределения температуры теплоносителя на трубках гелиоколлектора в зависимости от направления теплоносителя «снизу вверх» (а) и «сверху вниз» (б)

Очевидным является отрицательное влияние естественного циркуляционного давления на распределение расходов воды при направлении теплоносителя в коллекторе «снизу вверх» (рис. 7а). В этом случае расход воды больше в элементах № 1 и 8 по отношению к расходу в элементе № 5.

При направлении теплоносителя в коллекторе «сверху вниз» естественное циркуляционное давление противонаправлено основной насосной циркуляции, что положительно сказывается на равномерности распределения расходов воды по параллельным элементам гелиоколлектора (рис. 7б). Поэтому данная схема была принята для выполнения второго этапа исследований.

Второй этап исследований являлся экспериментальной проверкой (3). Варьировались независимые переменные G , t_n , t_b , q_c . Эксперименты проводились при стационарных условиях теплообмена. Результаты экспериментов были обработаны в виде критериальной зависимости (3) и приведены в графическом виде на рис. 8. Пунктирная линия является условно нанесенной для ориентации в результатах исследований как доказательных о равномерности предлагаемой зависимости (3).

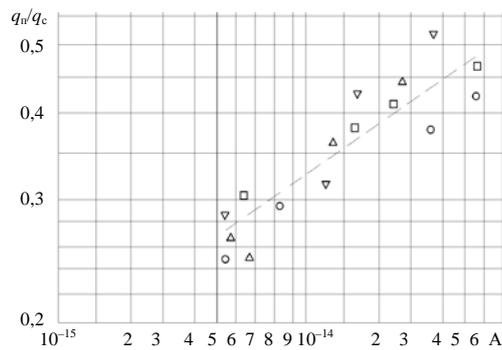


Рис. 8. Зависимость КПД коллектора от критерия A : \circ – $t_n = 5^\circ\text{C}$, $q_c = 580 \text{ Вт/м}^2$, $G = 35 \text{ кг/ч}$; \triangle – 20°C , 270 Вт/м^2 , 35 кг/ч ; \square – 14°C , 580 Вт/м^2 , 25 кг/ч ; ∇ – 25°C , 580 Вт/м^2 , 25 кг/ч

Проведенные исследования позволили разработать энергоэффективный вариант гелиосистемы для домов усадебного типа (рис. 9).

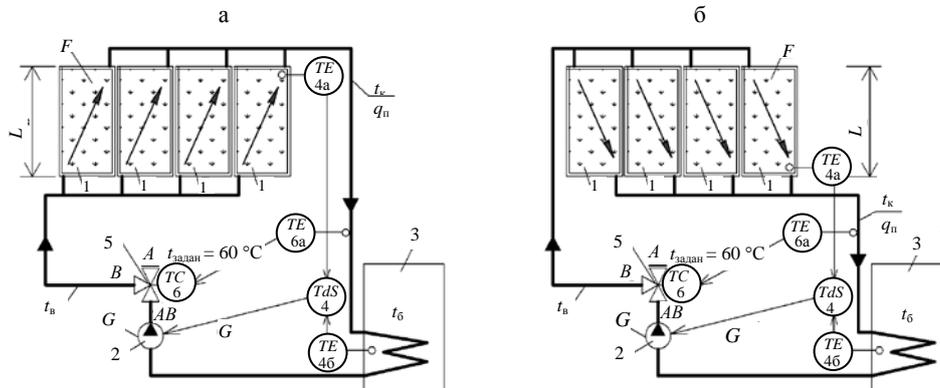


Рис. 9. Предлагаемые к проектированию принципиальные схемы гелиосистем горячего водоснабжения для домов усадебного типа: а – при циркуляции теплоносителя «снизу вверх» для коллекторов по схеме рис. 3б; б – при циркуляции теплоносителя «сверху вниз» для коллекторов по схеме рис. 3а; 1 – плоский гелиоколлектор; 2 – циркуляционный насос с электронным управлением скоростью вращения ротора по перепаду давления; 3 – бак-аккумулятор; 4 – двухпозиционный регулятор перепада температуры; 4а, 4б – датчики температуры соответственно на выходе из гелиоколлектора и в баке аккумулятора; 5 – трехходовой термостатический клапан на разделении потоков; 6 – пропорциональный регулятор температуры прямого действия, 6а – жидкостный датчик температуры – термобаллон

В предлагаемых гелиосистемах (рис. 9) учитывается конструкция плоского гелиоколлектора при выборе направления теплоносителя, а также обеспечивается температура теплоносителя не менее 60 °С при малых значениях интенсивности излучения за счет применения пропорционального регулятора 6 прямого действия и циркуляционного насоса 2 с электронным управлением скоростью вращения ротора, реагирующего на дросселирующий эффект работы клапана 5.

ВЫВОДЫ

1. При использовании гелиоколлекторов с параллельным соединением элементов (рис. 3а) и при параллельном соединении гелиоколлекторов между собой (рис. 4б) следует проектировать гелиосистему с направлением движения теплоносителя «сверху вниз».

2. При выполнении тестовых испытаний коллекторов насосных гелиосистем результаты испытаний необходимо обрабатывать и представлять в виде не только (1), но и предлагаемой критериальной зависимости (3), так как (1) дает только оценочную характеристику гелиоколлекторов для сравнения их различных типов.

3. Предложенная критериальная зависимость (3) позволяет выполнять проектные тепловые и гидравлические расчеты гелиосистем при параллельном (рис. 4б) и последовательном (рис. 4в) соединениях гелиоколлекторов в гелиосистеме домов усадебного типа.

4. Гидравлическая схема проектируемых гелиосистем должна предусматривать автоматическое уменьшение расхода теплоносителя при сни-

жении интенсивности солнечного излучения, что значительно увеличит сезонную эффективность гелиосистемы за счет повышения температуры нагрева теплоносителя при малой интенсивности излучения и снижении периода «пауз» в двухпозиционном режиме автоматического управления гелиосистемой.

5. Возобновляемые источники энергии для домов усадебного типа могут способствовать улучшению экономической и экологической обстановки, снижению потребления традиционных энергоресурсов, так как они автономны, эффективны и зачастую требуют небольших дополнительных ресурсов. Наиболее рациональны смешанные технологии, работающие на различных видах энергетического сырья, например энергии Солнца и биогаза, так как использование солнечной энергии расширяет функциональные возможности биогазовой системы, обеспечивает работу в широком диапазоне температур, создавая необходимые параметры для требуемого технологического решения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Положительное решение ГК по науке и технологиям РБ на выдачу патента на изобретение от 31.03.2011 на заявку № а 20110392 Технологическая установка для производства и утилизации биогаза в системах семейно-бытового типа / Б. М. Хрусталева, Тху Нга Нгуен, Кхак Туэн Чан, В. Д. Сизов.
2. Нгуен, Т. Н. К вопросу применения биогазовых установок: организационно-технологическая модель / Т. Н. Нгуен // Вестник БНТУ. – 2011. – № 2. – С. 75–82.
3. Расчет систем солнечного теплоснабжения / У. Бекман [и др.]; пер. с англ. – М.: Энергоиздат, 1982. – 80 с.
4. Андерсон, Б. Солнечная энергия: основы строительного проектирования / Б. Андерсон; пер. с англ. А. Р. Анисимова; под ред. Ю. Н. Малевского. – М.: Стройиздат, 1982. – 375 с.
5. Харченко, Н. В. Индивидуальные солнечные установки / Н. В. Харченко. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 208 с.
6. Системы солнечного тепло- и хладоснабжения / Р. Аvezов [и др.]; под ред. Э. Сарнацкого, С. Чистовича. – М.: Стройиздат, 1990. – 328 с.
7. O t h m a r, H u m m. Niedrigenergiehauser in Theorie und Praxis. 226 S.m.v. Abb., 1990.
8. M a c h, T. IEA Solar Heating & Cooling Programme / T. Mach, R. Heimrath // Task 37: Fortschrittliche thermische Gebäudesanierung. Berichte aus Energie – und Umweltforschung. 162s. 57/2010.
9. P o k o t i l o v, V. V. Heliosystems and bioclimatic architecture for Belarus condition / V. V. Pokotilov, S. A. Makarevich, S. A. Zenhanka // CISBAT' 99. Conference Internationale Energie Solaire et Batiment. Lausanne 22–23 septembre 1999, EPFL, Batiment LESO. – P. 283–287.
10. Гухман, А. А. Введение в теорию подобия / А. А. Гухман. – М.: Высш. шк., 1973. – 254 с.
11. Исаченко, В. П. Теплопередача: учеб. – 4-е изд., перераб. и доп. / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981. – 417 с.
12. Кирпичев, М. В. Теория подобия / М. В. Кирпичев // Теория подобия и тепловое моделирование / АН СССР. – М.: Наука, 1987. – С. 58–103.
13. Покотилов, В. В. Испытания пассивного воздушного коллектора солнечной энергии / В. В. Покотилов, А. Д. Шалак // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1994. – № 3–4. – С. 85–92.

Представлена кафедрой
теплогазоснабжения и вентиляции БНТУ

Поступила 25.05.2011