

6. Alekseyev A.I., Alekseyev A.A. Khimiya vody [Water chemistry]. SPb., Khimizdat, 2017. 424 p. (in Rus.)

7. Zatsepina G.N. Svoystva i struktura vody [Properties and structure of water]. Moscow, MGU, 1998. 184 p. (in Rus.)

8. Koltovoy N.A. Struktura i svoystva vody [Structure and properties of water]. Moscow, 2017. 380 p. (in Rus.)

9. Kasatkin A.S. Elektrotehnika [Electrical engineering technology]. Moscow, Energiya, 1974. 560 p. (in Rus.)

10. Vorobiyev V.A. Elektrotekhnologii v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve [Electrotechnologies in agricultural production]. Moscow, TRANSL-LOG, 2018. 198 p. (in Rus.)

The paper was received on March 20, 2018

УДК 621.22

DOI 10.26897/1728-7936-2018-4-69-74

АНДРЕЕВ СЕРГЕЙ АНДРЕЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент

E-mail: asa-finance@yandex.ru

КОЖЕВНИКОВА НАТАЛЬЯ ГЕОРГИЕВНА, канд. техн. наук, доцент

E-mail: ngk-ob@mail.ru,

ШИБАРОВ ДМИТРИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ, аспирант

E-mail: dmitriy16@mail.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 125550, ул. Тимирязевская, 49, Москва, Российская Федерация

УТИЛИЗАЦИЯ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ЖИДКОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В КОЛЛЕКТОРНЫХ ГЕЛИОСИСТЕМАХ

Рассмотрена возможность частичной утилизации избыточной кинетической энергии жидкого теплоносителя в гелиосистемах. Кинетическая энергия движущейся жидкости, преобразуясь в энергию вращения крыльчатки, далее может быть использована в механической или в электрической формах. На основе анализа зависимости плотности воды от температуры, заданных значений температуры теплоносителя на входе и выходе коллектора и учета геометрических параметров гелиосистемы, определена мощность, развиваемая крыльчаткой, установленной в замкнутом трубопроводе. Выявлены факторы, влияющие на величину этой мощности, и сделан вывод о значении правильного выбора теплоносителя. Рассмотрен ряд распространенных жидкостей, которые можно использовать в качестве теплоносителя в гелиосистемах. К предполагаемому теплоносителю предъявляется ряд требований: он должен обладать максимальной разностью плотностей на границах интервала рабочих температур, низкой вязкостью, постоянством фазового состояния, достаточной теплоемкостью, не проявлять агрессивных свойств по отношению к материалу крыльчатки и труб, быть экологически безопасным, безвредным к персоналу, взрыво-пожаробезопасным, дешевым и способным сохранять перечисленные свойства длительное время. В результате анализа полутора десятка жидкостей сделано два вывода: 1) наибольшую эффективность использования демонстрирует пропиленгликоль; 2) выбор теплоносителя обусловлен особенностями эксплуатации гелиосистем.

Ключевые слова: коллекторные гелиосистемы, естественное движение теплоносителя, плотность жидкости, кинетическая энергия, мощность.

Введение. Наряду с фотоэлектрическими преобразователями световой энергии в электрическую в современных гелиосистемах широко применяются разнообразные солнечные коллекторы, преобразующие энергию солнечного спектра в тепловую форму [1]. Такие гелиосистемы довольно просты, надежны и хорошо себя зарекомендовали при эксплуатации на разных широтах. В основу коллекторных гелиосистем положен принцип циркуляции жидкого те-

плоносителя, прогревающегося в коллекторах и отдающего полученную тепловую энергию потребителям или аккумуляторам [2]. При этом циркуляция теплоносителя во многих гелиосистемах происходит естественным образом. Практика показывает, что кинетическая энергия, приобретенная теплоносителем за счет разности плотностей в зонах нагрева и охлаждения, вполне достаточна для его уверенного течения по трубопроводам гелиосистемы. Часть этой энергии

без ущерба для технических характеристик системы можно утилизировать, направляя на удовлетворение ее собственных нужд по управлению процессом.

Цель работы – теоретическое обоснование возможности частичной утилизации кинетической энергии теплоносителя в гелиосистемах, оценка энергетических характеристик процесса и выбор теплоносителя.

Материал и методы. В качестве материалов исследований были использованы информация из теории гидростатики, сведения о физических свойствах жидкостей, а также результаты рекогносцировочных экспериментов. При выполнении исследований применен метод аналогии, позволивший сопоставить физические процессы, протекающие в гелиосистемах и системах отопления с естественной циркуляцией теплоносителя.

Результаты и обсуждения. Эксплуатация солнечных коллекторов обычно сопровождается движением теплоносителя. Это движение может быть обусловлено работой специального циркуляционного насоса, но может быть и естественным – за счет разности плотностей жидкости при различных температурах. В гелиосистемах с применением воды прогретый теплоноситель имеет меньшую плотность, чем охлажденный, поэтому аналогично работе отопительной системы, прогретая вода с выхода солнечного коллектора поднимается вверх, проходит через теплообменники потребителей и, остывая, постепенно опускается вниз. Поскольку гелиосистема является замкнутой, в ней происходит непрерывное естественное движение теплоносителя по внешнему контуру от выхода коллектора к его входу. При этом максимальную температуру теплоноситель имеет на выходе коллектора (обычно 55...65°C), а минимальную – на входе (35...45°C).

Скорость естественного течения жидкости в таких системах весьма небольшая, однако это не мешает часть кинетической энергии теплоносителя преобразовать в механическую, а затем в электрическую. Механическая энергия может быть использована для обслуживания собственных нужд гелиосистемы (поворота коллекторов вслед за Солнцем, управления смесительными кранами и т.д.), а электрическая – для питания измерительной аппаратуры, процессоров и небольших исполнительных механизмов.

Эта мера позволяет достичь полной автономности гелиосистем, исключить их зависимость от внешнего электроснабжения или от использования химических источников электрической энергии.

Известны некоторые технические решения по утилизации кинетической энергии жидкости, движущейся по замкнутому трубопроводу за счет разности плотностей [3, 4]. Экспериментальная проверка подтвердила реализуемость такого приема, однако научно обоснованная оценка энергетических характеристик используемого явления пока не проводилась. Для отопительных систем, для работы насоса предлагалось использовать преобразованную кинетическую энергию теплоносителя, периодически пополняющего систему водой из скважины.

Приблизительная оценка мощности, развиваемой крыльчаткой в замкнутом трубопроводе, может быть сделана по результатам сравнения отопительных систем с естественной и принудительной циркуляцией теплоносителя. В системах с принудительной циркуляцией движение теплоносителя происходит примерно в 3 раза интенсивнее, чем в системах с естественным течением [5, 6]. Зная мощность циркуляционного насоса, поделив ее на 3 и приняв во внимание КПД, можно ориентировочно сделать заключение о развиваемой мощности. Однако при таком подходе возможна значительная ошибка вследствие неизвестности степени загрузки циркуляционного насоса (если насос был выбран с большим запасом по производительности, рассчитанная мощность окажется завышенной).

Более точный результат можно получить, сделав гидравлический расчет. При этом будем считать, что жидкость в гелиосистеме совершает движение по замкнутому трубопроводу, имеющему форму тора (рис. 1). Такое допущение позволяет пренебречь локализованными потерями давления в трубопроводе и принять, что эти потери равномерно распределены по всему пути движения жидкости, представляющему собой окружность с радиусом R .

Механическая энергия будет определяться диаметром трубопровода, расстоянием между точками нагрева и охлаждения жидкости по высоте, зависимостью плотности жидкости от температуры, ее вязкостью, величиной разности температур, а также различными сопротивлениями движению потока.

Будем считать, что нагрев жидкости происходит в пределах некоторого малого объема, сконцентрированного в точке M . Эта точка расположена в третьем квадранте гелиосистемы, на середине дуги AB . В качестве жидкости рассмотрим воду. Известно, что при увеличении температуры воды, начиная с 4°C, ее плотность уменьшается. Тогда нагретая в коллекторе (в точке M) вода будет подниматься по дуге трубопровода MD , затем охлаждаться и опускаться по дуге DBM . Таким образом, движение воды будет происходить по часовой стрелке. При высоте одно- двухэтажного жилого дома примем расстояние от нижней до верхней точки окружности, равное 4 м. Тогда весь путь жидкости, или длина окружности составит $C = 2\pi R = 12,56$ м.

Для расчета высоты подъема воды H за счет изменения ее плотности найдем длину отрезка OL , соединяющего точку пересечения перпендикуляра, опущенного из точки M на линию BD :

$$OL = R \cdot \cos 45^\circ = 1,42 \text{ м}$$

$$\text{или } H = R + OL = 3,42 \text{ м.}$$

Будем считать, что на входе в солнечный коллектор температура воды составляет 40°C (до нагрева), а на его выходе она повысится до 60°C. Плотность воды при этих температурах определится значениями $\rho_1 = 992 \text{ кг/м}^3$ и $\rho_2 = 983 \text{ кг/м}^3$ [6] соответственно.

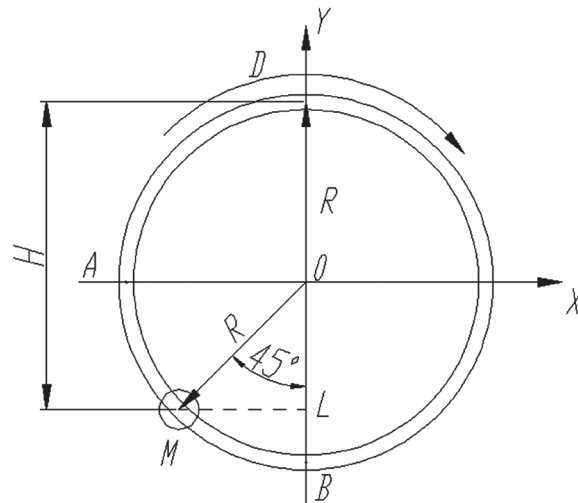


Рис. 1. Схема движения воды по замкнутому трубопроводу под влиянием разности температур

Найдем величину гидравлического напора:

$$F = g \cdot H \cdot (\rho_2 - \rho_1), \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

В результате подстановки численных значений получим: $F = 306 \text{ Па} = 0,03 \text{ мм вод. столба}$.

Будем считать, что в гелиосистеме используются «дюймовые» трубы с внутренним диаметром $0,0254 \text{ м}$. Допущение об отсутствии местных потерь позволяет приравнять величину рассчитанного гидравлического напора потерям напора по всей длине трубопровода [7]:

$$F = \lambda \frac{C \cdot V^2}{d \cdot 2 \cdot g}, \quad (2)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения (коэффициент Дарси); d – диаметр трубы, м; V – скорость движения воды, м/с.

Коэффициент Дарси для ламинарного режима движения воды определяется соотношением $\lambda = \frac{64}{Re}$, где Re – число Рейнольдса. Известно, что для ламинарного режима $0 < Re < 2320$. Тогда при $Re = 2000$ коэффициент Дарси $\lambda = 0,03$.

Из соотношения (2) выразим значение скорости потока жидкости:

$$V = \sqrt{\frac{2gFd}{C\lambda}}.$$

Подставив численные значения, получим $V = 0,197 \text{ м/с}$. При этом расход воды найдем как произведение $Q = V \cdot S$, где S – сечение трубы, м. Для трубопровода с принятыми параметрами $Q = 0,932 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с} = 0,33 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Принимая во внимание, что в рабочем диапазоне температур средняя плотность воды составляет 990 кг/м^3 , делаем заключение о перемещении

по трубопроводу гелиосистемы $326,7 \text{ кг}$ воды в течение часа. Такая же масса воды окажется поднятой на высоту H . Эта вода приобретет потенциальную энергию A , определяемую $A = mgH = 10,960 \text{ Дж}$, которая в пересчете на 3600 секунд будет характеризоваться мощностью 3 Вт .

Полученное значение невелико. Учитывая гидравлический КПД крыльчатки, электрический КПД генератора, а также факт утилизации только части преобразованной энергии, можно сделать вывод, что в распоряжении потребителя останутся $2,0 \dots 2,3 \text{ Вт}$. Такого резерва мощности окажется достаточным для питания несложных электронных схем или микродвигателей. Заметим, что увеличение утилизируемой мощности можно достичь путем подъема высоты жидкости, увеличением диаметра или количества труб, а также возрастанием разности плотностей жидкости, сосредоточенной в скобках выражения (1). Зависимость преобразованной мощности от диаметра труб и высоты подъема воды представлена на рисунке 2.

Увеличение высоты подъема нагретой жидкости имеет чисто физический предел, что не всегда возможно на практике, так как этому препятствуют архитектурные требования. Увеличение утилизируемой мощности за счет увеличения диаметра или количества труб также не всегда эффективно, так как главной целью гелиосистемы остается получение теплоты, а исходными данными при ее проектировании являются теплотехнические характеристики. Кроме того, эта мера увеличит габариты, массу и стоимость установки, что не всегда допустимо. Из перечисленных условий реальным остается повышение разности плотностей теплоносителя, которая формируется в рабочем диапазоне температур. Зависимость этой величины от температуры определяется свойствами теплоносителя, поэтому правильность его выбора приобретает особое значение.

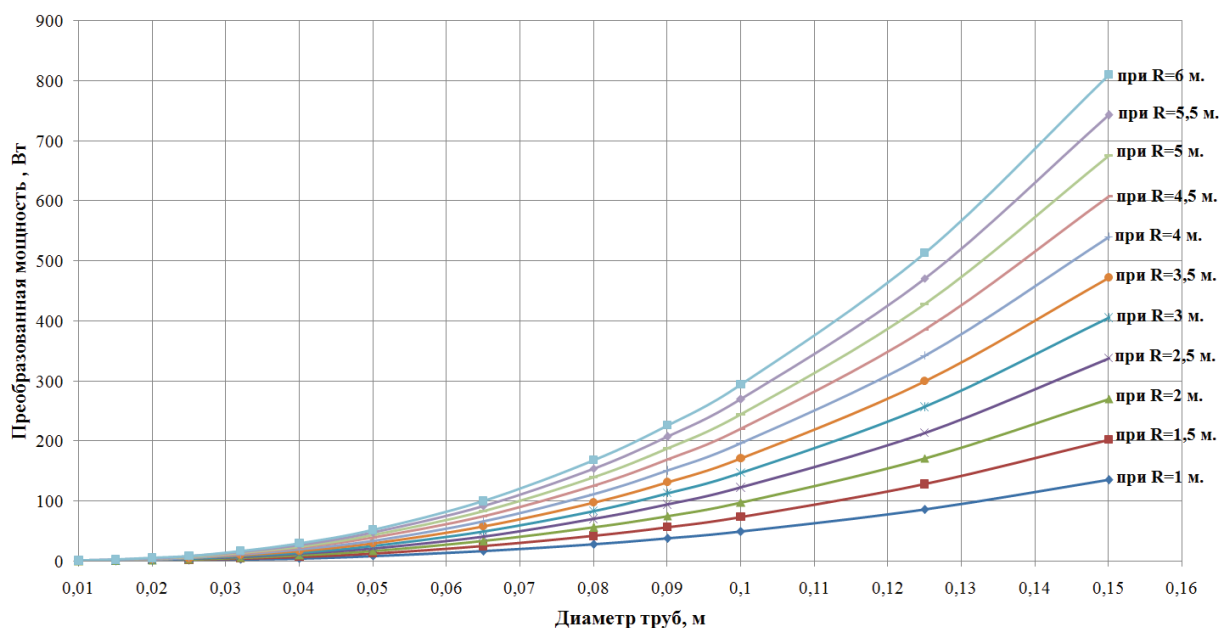


Рис. 2. Зависимость преобразованной мощности от диаметра труб и высоты подъема воды

Сформулируем основные требования, которым должна удовлетворять жидкость, используемая в качестве теплоносителя:

- максимальная разность плотностей на границах интервала рабочих температур;
- низкая вязкость;
- постоянство фазового состояния в рабочем диапазоне температур;
- отсутствие агрессивных свойств по отношению к материалу крыльчатки и труб;
- экологическая безопасность, безвредность по отношению к персоналу, взрывопожаробезопасность;
- доступность, низкая стоимость, возможность длительного использования без изменения вышеперечисленных свойств.

– высокая теплоемкость.

Рассмотрим ряд жидкостей, не уступающих воде по первому из сформулированных требований [8]. Поскольку при эксплуатации гелиосистем возможен выход температуры теплоносителя за границы принятого в качестве примера рабочего диапазона, ограничим перечень рассматриваемых жидкостей только такими, у которых температура кипения превышает 80°C. Более того, для удовлетворения требования по текучести будем анализировать жидкости, у которых динамический коэффициент вязкости не превышает значения, свойственного воде, более чем на 20%. Оценку эффективности использования жидкостей произведем по величинам мощностей, рассчитанным по вышеприведенному алгоритму для гелиосистемы с ранее принятыми геометрическими параметрами. Результаты сопоставления жидкостей, оказавшихся эффективнее воды, представлены в таблице.

Не все из включенных в таблицу жидкостей удовлетворяют поставленным требованиям. Например, у этилацетата и тетрахлорметана температура

кипения немного не достигает 80°C, а у тетрахлорметана и трихлорэтана динамический коэффициент вязкости превышает значение этого показателя для воды более чем на 20%. В то же время использование трихлорэтана или тетрахлорметана представляется весьма заманчивым вследствие относительно высоких значений преобразованных мощностей (в 2,5 и 3 раза соответственно). Принимая во внимание низкую температуру кипения тетрахлорметана, можно сделать вывод о целесообразности его использования в качестве теплоносителя в низкотемпературных гелиосистемах. Аналогично трихлорэтан целесообразно применять в системах с небольшой протяженностью трубопроводов, содержащих минимум местных сопротивлений.

Отметим, что все рассмотренные жидкости уступают воде по теплоемкости. Например, если массовая теплоемкость воды составляет 4,19 кДж/кг·град., то у тетрахлорметана в рабочем диапазоне температур она не превышает 0,88 кДж/кг·град., а у трихлорэтана – 1,17 кДж/кг·град. В ряду рассмотренных жидкостей максимальную теплоемкость имеет этилацетат (2,05 кДж/кг·град.), но и в этом случае рабочая поверхность теплообменных аппаратов должна быть примерно в два раза больше, чем при использовании воды.

Главным недостатком всех рассмотренных жидкостей (кроме воды!) является высокая токсичность. И только бензол, хлорбензол и этилацетат не требуют принятия особых мер безопасности. В то же время тетрахлорметан и трихлорэтан относятся к сильно ядовитым веществам, проявляющим явные канцерогенные и наркотические свойства [9, 10].

Представляют интерес этиловый спирт и глицоли. Этиловый спирт, используемый в коллекторной гелиосистеме с принятыми геометрическими размерами, обеспечит получение мощности 3,42 Вт

при средней теплоемкости 2,67 кДж/кг·град. Однако низкая температура кипения этилового спирта (78,3°C) существенно ограничивает возможность его применения в качестве теплоносителя.

Сравнительные характеристики теплоносителей

Наименование жидкости	Температура кипения, °С	Среднее значение динамического коэффициента вязкости, в рабочем диапазоне температур, Па/с	Плотность при 40°C, кг/м ³	Плотность при 60°C, кг/м ³	Преобразованная мощность, Вт
Вода	100,0	577,9	992,0	982,9	3,1
Бензол	80,1	447,5	858,0	837,0	4,0
Толуол	110,6	428,5	850,1	831,1	3,8
Ортоксилол	144,4	561,5	863,6	846,8	3,6
Метаксилол	138,1	446,0	848,0	830,0	3,7
Параксилол	138,4	463,0	844,0	827,0	3,6
Этилацетат	77,06	332,9	875,0	850,0	5,4
Тетрахлорметан	76,60	659,3	1556,0	1518,0	9,8
Дихлорэтан	83,4	581,0	1224,0	1194,0	6,8
Трихлорэтан	113,9	695,2	1589,0	1557,0	8,3
Хлорбензол	131,8	581,0	1085	1064,0	5,08

Среди гликолей наибольшее распространение получили этиленгликоль и пропиленгликоль. Этиленгликоль в различной концентрации широко используется в качестве охлаждающей жидкости в автомобильных двигателях. Теплоемкость этиленгликоля близка к теплоемкости воды, однако разность плотностей этого вещества на границах температурного диапазона невелика, что не позволяет преобразовать мощность более 2,9 Вт. В отличие от этилового спирта этиленгликоль весьма токсичен, что создает дополнительные неудобства при эксплуатации гелиосистем.

Пропиленгликоль в 25%-й концентрации при температурах 40 и 60°C характеризуется плотностью 1420 и 903 кг/м³ соответственно. Имея теплоемкость 4,0 кДж/кг·град., пропиленгликоль обеспечивает в тех же условиях преобразование 3,8 Вт. Это вещество практически безопасно, однако стоимость его в 2,5 раза превышает стоимость распространенного этиленгликоля.

Выводы

Оценка энергетических показателей процесса преобразования кинетической энергии теплоносителя в механическую форму показала возможность его практического использования в коллекторных гелиосистемах. При этом в качестве теплоносителя целесообразно применять этилацетат, трихлорэтан или этилацетат. Окончательный выбор теплоносителя во многом определяется назначением и особенностями гелиосистемы. Следуя изложенной последовательности вычислений и производя расчет по приведенным формулам, можно оперативно оценивать количественные показатели утилизации кинетической энергии теплоносителей и создавать условия для ее эффективности.

Библиографический список

1. Бринкворт Дж. Солнечная энергия для человека. Пер.с англ. В.Н. Оглоблева; под ред. и с предисл. Б.В. Тарнижевского. М.: Мир, 1976. 291 с.
2. Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки. М.: Энергоатомиздат, 1991. 208 с.
3. Устройство для подъема воды 2013152074/13: Патент № 143227 Российская Федерация МПК E03 B3/00 (2006.01) / С.А. Андреев, Ю.А. Судник, Д.В. Шибаров; заявл. 25.11.2013; опубл. 20.07.2014. Бюл. № 20.
4. Устройство для получения электроэнергии 2014140412/06: Патент № 156079 Российская Федерация МПК F24 J3/08, F03 G7/04 / С.А. Андреев, Ю.А. Судник, Д.В. Шибаров; заявл. 07.10.2014; опубл. 27.10.2015. Бюл. № 30.
5. Аvezов Р.Р., Орлов А.Ю. Солнечные системы отопления и горячего водоснабжения. Ташкент: ФАН, 1988. 286 с.
6. Бекман У., Клейн С., Даффи Дж. Расчет системы солнечного теплоснабжения. М.: Энергоиздат, 1982. 80 с.
7. Чугаев Р.Р. Гидравлика: Учебник для ВУЗов. 4-е изд., доп. и перераб. Л.: Энергоиздат, 1982. 672 с.
8. Савельев Н.И. Теплофизические свойства жидких веществ и растворов: Справочное пособие по курсовому проектированию по процессам и аппаратам химической технологии. Чебоксары, 2016. 34 с.
9. Крамаренко В.Ф. Токсикологическая химия. К.: Вища школа, 1989. 447 с.
10. Оцин Л.А. Промышленные хлорорганические продукты. М.: Химия, 1978. 656 с.

Статья поступила 19.03.2018

UTILIZATION OF KINETIC ENERGY OF HEAT TRANSFER LIQUID IN COLLECTOR-BASED SOLAR SYSTEMS

SERGEY A. ANDREYEV, PhD (Eng), Associate Professor

E-mail: asa-finance@yandex.ru

NATALIA G. KOZHEVNIKOVA, PhD (Eng), Associate Professor

E-mail: ngk-ob@mail.ru

DMITRY V. SHIBAROV, postgraduate student

E-mail: dmitriy16@mail.ru

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Timiryazevskaya Str., 49, Moscow, 127550, Russian Federation

The paper considers a possibility of partial utilization of excessive kinetic energy of a liquid coolant in solar systems. The kinetic energy of a moving fluid is transformed into rotational energy of the impeller and can then be used in a mechanical or electrical form. Basing on the dependence analysis of water density on temperature, the set values of the coolant temperature at the collector inlet and outlet, and the geometric parameters of the solar system, the authors have determined the power developed by the impeller installed in the closed pipeline. Factors influencing the amount of this power have been revealed, and a conclusion has been made about the role of the right coolant use. The authors consider a number of common liquids that can be used as a coolant in solar systems. The authors state the main requirements made for the coolant: a maximum density difference at the boundaries of the operating temperature range, low viscosity, constancy of the phase state, sufficient heat capacity, no aggressive properties with respect to the material of the impeller and pipes, environmental friendliness, harmless use by the personnel, explosion and fire-proof features, cheapness and ability to preserve the listed properties for a long time. As a result of the analysis including one and a half dozen liquids, conclusions have been made about 1) the most effective use of propylene glycol, and 2) the influence of the operating features of solar systems on the choice of coolant.

Key words: collector-based solar systems, natural motion of coolant, fluid density, kinetic energy, power.

References

1. Brinkworth J. Solnechnaya energiya dlya cheloveka [Solar energy for man]. Translated by V.N. Ogloblev; ed. and with a preface by B.V. Tarnizhevskiy. Moscow, Mir, 1976. 291 p. (in Rus.)
2. Kharchenko N.V. Individual'nyye solnechnyye ustanovki [Individual solar installations]. Moscow, Energoatomizdat, 1991. 208 p. (in Rus.)
3. Andreyev S.A., Sudnik Yu.A., Shibarov D.V. Ustroystvo dlya pod'yema vody [Device for water lifting] 2013152074/13: Patent No. 143227 Rossiyskaya Federatsiya MPK E03 B3/00 (2006.01); applied on 25.11.2013; issued on 20.07.2014. Bul. No. 20. (in Rus.)
4. Andreyev S.A., Sudnik Yu.A., Shibarov D.V. Ustroystvo dlya polucheniya elektroenergii [Device for electricity generation] 2014140412/06: Patent No. 156079 Rossiyskaya Federatsiya MPK F24 J3/08, F03 G7/04; applied on 07.10.2014; issued on 27.10.2015. Bul. No. 30. (in Rus.)
5. Avezov R.R., Orlov A.Yu. Solnechnyye sistemy otopleniya i goryachego vodosnabzheniya [Solar heating and hot water supply systems]. Tashkent, FAN, 1988. 286 p. (in Rus.)
6. Beckman U., Klein S., Duffi J. Raschet sistemy solnechnogo teplosnabzheniya [Calculation of solar power supply system]. Moscow, Energoizdat, 1982. 80 p. (in Rus.)
7. Chugayev R.R. Gidravlika: Uchebnik dlya VU-Zov [Hydraulics: Study manual for university students]. 4th ed., extended and reviewed. L., Energoizdat, 1982. 672 p. (in Rus.)
8. Savel'yev N.I. Teplofizicheskiye svoystva zhidkikh veshchestv i rastvorov: Spravochnoye posobiye po kursovomu proyektirovaniyu po protsessam i apparatam khimicheskoy tekhnologii [Thermophysical properties of liquid substances and solutions: Reference manual on the design of processes and devices of chemical technology]. Cheboksary, 2016. 34 p. (in Rus.)
9. Kramarenko V.F. Toksikologicheskaya khimiya [Toxicological chemistry]. K., Vishcha shkola, 1989. 447 p. (in Rus.)
10. Oshchin L.A. Promyshlennyye khlorganicheskiye produkty [Industrial chlororganic products]. Moscow, Khimiya, 1978. 656 p. (in Rus.)

The paper was received on March 19, 2018