



Оригинальная статья / Original article

УДК 697.7:519.6

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-6-75-84>

ОЦЕНКА ЗНАЧИМОСТИ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ НА ТОЧНОСТЬ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ СИСТЕМ СОЛНЕЧНОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

© Д.А. Константинова¹

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
129337, Российская Федерация, г. Москва, Ярославское шоссе, 26.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Данная работа нацелена на оценку уровня значимости параметров, оказывающих влияние на точность математического моделирования систем солнечного теплоснабжения. **МЕТОДЫ.** Производится численное моделирование работы системы солнечного теплоснабжения в соответствии с дробными планами эксперимента при различном наборе влияющих на ее работу параметров. С помощью дисперсионного анализа полученных данных определяется степень значимости рассматриваемых параметров. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** В результате проведенного анализа параметров, оказывающих влияние на работу систем солнечного теплоснабжения, выделено две группы: параметры конструкции и параметры расчета. Параметры расчета влияют на точность модели работы системы. Спланировано и проведено с применением дробных реплик восемь численных экспериментов при одинаковых исходных условиях (фиксированные параметры конструкции) и различных комбинациях параметров расчета с применением алгоритма Йетса. В результате проведения численных экспериментов определены степени значимости параметров для различных выходных характеристик. Выходные характеристики выступают как показатели работоспособности системы, среди них: время работы насоса, количество переданной воде в баке-аккумуляторе теплоты, продолжительность периода обеспеченности потребителя нагретой водой. **ВЫВОДЫ.** Учет наибольшего числа параметров при моделировании работы систем солнечного теплоснабжения дает большую точность результатов. Наиболее значимыми параметрами при заданных параметрах конструкции являются коэффициент теплопередачи теплообменника бака-аккумулятора и тепловые потери наружных элементов системы. Таким образом, среди выделенных параметров расчета указанные два параметра рекомендуется учитывать, в то время как основными физическими свойствами сред и тепловыми потерями внутренних элементов допустимо пренебречь.

Ключевые слова: системы солнечного теплоснабжения, солнечный коллектор, численный эксперимент, математическое моделирование, численное моделирование, дисперсионный анализ.

Информация о статье. Дата поступления 10 апреля 2018 г.; дата принятия к печати 11 мая 2018 г.; дата онлайн-размещения 29 июня 2018 г.

Формат цитирования. Константинова Д.А. Оценка значимости влияния параметров на точность математического моделирования работы систем солнечного теплоснабжения // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 6. С. 75–84. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-6-75-84

EVALUATION OF PARAMETER INFLUENCE ON THE ACCURACY OF SOLAR HEATING SYSTEM OPERATION MATHEMATICAL MODELING

D.A. Konstantinova

Moscow State (National Research) University of Civil Engineering
26, Yaroslavl'skoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

ABSTRACT. The PURPOSE of the work is to evaluate the importance level of parameter influence on the accuracy of solar heating system mathematical modeling. **METHODS.** The numerical modeling of solar heating system operation is carried out in accordance with the fractional factorial designs under different combinations of parameters affecting its operation. The importance of the parameters under investigation is determined by means of variance analysis. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The analysis of parameters influencing the operation of solar heating systems allowed to distinguish two groups: construction parameters and calculation parameters. The calculation parameters affect the accuracy of the model of system operation. Using fractional factorial design, eight numerical experiments were

¹Константинова Дарья Аркадьевна, аспирант, konstantinovada@mgsu.ru
Daria A. Konstantinova, Postgraduate student, konstantinovada@mgsu.ru



planned and carried out under similar initial conditions (fixed construction parameters) and different combinations of calculation parameters using the Yates algorithm. Conducted numerical experiments allowed to determine the degree of parameter influence for different output characteristics. The latter are treated as indicators of system efficiency including the time of pump operation, amount of heat transferred to water in the storage tank, duration of the period when the user is provided with hot water. **CONCLUSIONS.** The more number of parameters are taken into account when modeling solar heating systems, the more accuracy of results is achieved. When the construction parameters are specified the most important parameters are the heat transfer coefficient of the storage tank heat exchanger and heat losses of external elements of the system. It is recommended to take into account these two calculation parameters while the primary physical properties of media and heat losses of internal elements of the system can be neglected when modeling solar heating systems.

Keywords: *solar heating systems, solar collector, numerical experiment, mathematical modeling, numerical modeling, variance analysis.*

Information about the article. Received April 10, 2018; accepted for publication May 11, 2018; available online June 29, 2018.

For citation. Konstantinova D.A. Evaluation of parameter influence on the accuracy of solar heating system operation mathematical modeling. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 6, pp. 75–84. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-6-75-84. (in Russian).

Введение

Работа системы солнечного теплоснабжения (ССТ) заключается в преобразовании поступающей энергии солнечных лучей в тепловую энергию, доступную потребителю [1]. Существуют различные подходы к математическому моделированию работы данных систем. Основной целью математического моделирования является оценка работоспособности системы из расчета на какой-либо временной промежуток [2–4]. Чаще всего системы рассчитываются на среднемесячные значения поступления и потребления энергии² [5]. В более редких случаях работа системы моделируется на среднегодовые или часовые значения показателей [6]. Кроме того, проектирование

теплообменников в ССТ следует производить на основе среднечасовых значений интенсивности солнечной радиации. Это регламентируется пунктом 4.8 ВСН 52-86 «Установки солнечного горячего водоснабжения», 1986 года.

Отличие математических моделей друг от друга состоит в различной степени их детализации – учете одних факторов и пренебрежении другими [7]. Степень влияния данных факторов и их сочетаний на точность математического моделирования недостаточно изучена. Таким образом, единого общепринятого подхода к моделированию работы систем солнечного теплоснабжения на настоящий момент не существует.

Математическая модель работы ССТ

Проведение численного эксперимента, описанного в данной работе, основывается на максимально подробной математической модели, включающей в себя описание работы всех элементов системы: солнечного коллектора, наружных и внутренних участков подающего и обратного трубопроводов, бака-аккумулятора, режимов потребления и поступления энергии в

систему. Разработанная математическая модель позволяет определять показатели работы системы в любой момент времени, в зависимости от заданного временного интервала моделирования.

Обеспеченность потребителя теплом характеризуется температурой воды в баке-аккумуляторе, величина которой напрямую зависит от интенсивности про-

²Бутузов В.А. Повышение эффективности систем теплоснабжения на основе возобновляемых источников энергии: дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.08. Краснодар, 2004. 297 с. / Butuzov V.A. Improving heat supply system efficiency based on renewable energy sources: Doctoral dissertation in technical sciences: 05.14.08. Krasnodar, 2004. 297 p.



цесса теплообмена между нагретым коллектором теплоносителем, находящимся внутри змеевика теплообменника и нагреваемой в баке водой. Так как в современных баках-аккумуляторах встраиваются теплообменники змеевикового типа объемной цилиндрической формы, а рассматриваемая система снабжена насосным оборудованием, со стороны теплоносителя теплоотдача осуществляется при турбулентном режиме течения жидкости. Со стороны нагреваемой среды (вода) вынужденная циркуляция не предусмотрена, и тепловосприятие осуществляется путем сво-

бодной конвекции. Математическая модель работы теплообменного аппарата, как одного из ключевых элементов системы солнечного теплоснабжения, изложена в работе [8].

Математическая модель работы всей системы солнечного теплоснабжения является достаточно объемной, в связи с этим, ее изложение в рамках данной статьи не представляется возможным. Ниже описаны параметры, учтенные в математической модели, оказывающие влияние на работу ССТ, а также их представление при численном моделировании.

Параметрические характеристики ССТ

В табл. 1 представлены параметры, оказывающие влияние на работу системы солнечного теплоснабжения.

Для определения уровня значимости каждого параметра в отдельности и их совместных взаимодействий необходимо

Таблица 1

Параметры, влияющие на работу ССТ

Table 1

Parameters influencing the operation of the solar heating system

№	Параметр / Parameter	Ед. изм. / Units	Обозначение / Symbol
1	Коэффициент теплопередачи теплообменника / Heat transfer coefficient of the heat exchanger	Вт/м ² / W/m ² , °C	K
2	Тепловые потери коллекторов / Heat losses of collectors	Дж / J	Q _{пот.кол}
3	Тепловые потери бака-аккумулятора / Heat losses of storage tank	Дж / J	Q _{пот.б}
4	Тепловые потери трубопроводов / Heat losses of pipelines	Дж / J	Q _{пот.тр}
5	Плотность сред / Media density	кг/м ³ / kg/m ³	ρ _{гр} , ρ _{нагр}
6	Теплоемкость сред / Media heat capacity	Дж/кг°C / J/kg°C	C _{гр} , C _{нагр}
7	Потребление горячей воды / Hot water consumption	Дж / J	Q _{потр}
8	Температура холодной воды / Cold water temperature	°C	t _{хв}
9	Объем бака-аккумулятора / Storage tank volume	л (м ³) / l (m ³)	V _б
10	Площадь поверхности теплообмена (площадь теплообменника) / Heat transfer surface area	м ² / m ²	F
11	Площадь коллектора / Collector area	м ² / m ²	S _{кол}
12	Оптический КПД / Optical efficiency	%	η
13	Угол наклона коллектора φ±15 (φ – географическая широта) / Collector tilt angle φ ±15 (φ – latitude)	градусы / degrees	β _{кол}



провести $2^{13} = 8192$ экспериментов, если каждый параметр будет поддерживаться на 2 уровнях. Проведение такого количества экспериментов не представляется возможным, поэтому предлагаются следующие ограничения.

Для определения точности модели расчета произведено разделение факторов на 2 группы – параметры конструкции и параметры расчета.

Параметры 1–6 составляют группу параметров расчета. Степень влияния параметров и их взаимодействий из данной группы характеризуют точность математической модели. С целью упрощения моделирования, указанные 6 факторов перегруппированы следующим образом: тепловые потери коллекторов, бака-аккумулятора и трубопроводов (п.п. 2–4) перегруппированы в 2 категории – наружные и внутренние тепловые потери; плотность и теплоемкость сред (п.п. 5, 6) объединены в одну группу – физические свойства сред. Таким образом, факторов, влияющих на точность математической модели, становится 4:

1. Коэффициент теплопередачи теплообменника (А).
2. Физические свойства сред (В).
3. Внутренние тепловые потери оборудования (С).
4. Наружные тепловые потери оборудования (D).

Буквы, указанные в скобках для каждого фактора, введены для удобства записи и обработки результатов дальнейших экспериментов.

К параметрам конструкции относятся факторы 7–13 (табл. 1), они фиксированы во всех расчетах.

Было принято выражать потребление горячей воды из системы $Q_{потр}$ в единицах количества теплоты, Дж. Предполагалось, что потребление горячей воды начинается при температуре выше 33°C .

Температура холодной воды $t_{хв}$ в течение года меняется в связи с изменением температуры грунта. При моделировании работы ССТ температура холодной воды принималась исходя из рассматриваемого месяца. Для холодного периода года – с октября по апрель – температура холодной воды принималась равной 4°C , с апреля по июнь температура возрастает до 23°C и далее постепенно снижается до 4°C к октябрю.

В зависимости от количества потребителей системы ГВС определяется объем бака-аккумулятора V_6 из расчета 80 л на человека. Данное допущение основывается на максимально адекватном количестве воды, потребляемом одним человеком в течение часа на нужды личной гигиены (душ) и уборку (в том числе мытье посуды), которое составляет максимум 80 л.

Кроме того, согласно³, для сельского жилого дома величина потребляемой в сутки горячей воды одним жителем при высокой интенсивности водоразбора составляет максимум 80 л при температуре воды 60°C .

Так как объем бака-аккумулятора задается производителем и является фиксированной величиной, значение которой далеко не всегда кратно 80 л, допускаются отклонения от заданной величины в пределах 10%.

Площадь поверхности теплообмена F является заводской характеристикой бака-аккумулятора и определяется выбранной моделью бака.

Существуют различные рекомендации по определению площади коллекторного поля $S_{кол}$. В данной работе требуемая площадь коллекторов при исходных климатических условиях и нагрузке на систему горячего водоснабжения (ГВС) была определена с использованием программного комплекса Polysun [9], позволяющего определить рекомендуемое количество солнечных коллекторов в одном из трех вариантов: система с быстрой окупаемостью, мак-

³Судаев Е.М. Повышение эффективности систем солнечного горячего водоснабжения сельских бытовых потребителей в условиях Сибири: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02. Красноярск, 2012 / Sudaev E.M. Improvement of solar hot water supply system efficiency for rural residential consumers in Siberia: Candidate's dissertation in technical sciences: 05.20.02. Krasnoyarsk, 2012



симально автономная система и усредненный вариант. Для системы с быстрой окупаемостью и баком-аккумулятором объемом 300 л рекомендуемая площадь солнечных коллекторов составляет 6 м².

Оптический КПД коллектора η является паспортной характеристикой и определяется выбранной моделью коллектора.

Солнечные коллекторы принято располагать под углом наклона к горизонту, $\beta_{кол}$ равным географической широте φ с от-

клонением $\pm 15^\circ$ для повышения интенсивности поглощения солнечных лучей в летнее ($\varphi - 15^\circ$) и зимнее ($\varphi + 15^\circ$) время [10].

Для проведения численного моделирования работы ССТ для ГВС принимается наиболее общая конструкция системы (рис. 1). Выбор данной конструкции определяется с одной стороны ее простотой и относительно низкой стоимостью, с другой – система включает в себя все основные элементы гелиоустановок для ГВС.

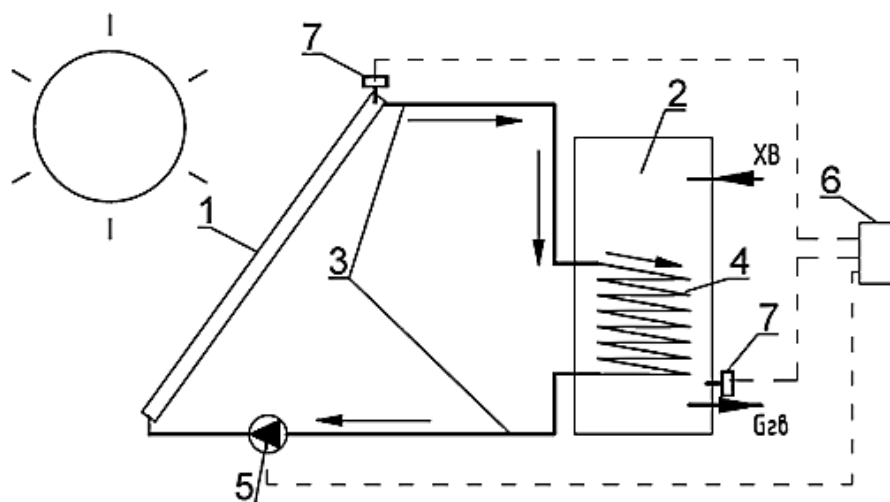


Рис. 1. Принципиальная схема одноконтурной системы солнечного теплоснабжения для ГВС:
1 – солнечный коллектор; 2 – бак-аккумулятор; 3 – трубопровод; 4 – теплообменник; 5 – насос;
6 – щит автоматики; 7 – датчик температуры

Fig. 1. Schematic diagram of a single-loop solar heating system for hot water supply:
1 – solar collector; 2 – storage tank; 3 – pipeline; 4 – heat exchanger; 5 – pump;
6 – automatic switchboard; 7 – temperature sensor

План численного эксперимента

Описанный ниже эксперимент проводился при следующих условиях:

1. Оборудование и его паспортные данные:

Модель и тип солнечного коллектора: плоский коллектор Vitosol 100SV1

Количество коллекторов: 3 шт.

Площадь одного коллектора: 2,3 м²

Угол наклона коллекторов: 70°

Модель бака-аккумулятора: Drazice OKCE 300 NTR

Объем бака-аккумулятора: 300 л

Толщина тепловой изоляции: 45 мм

Коэффициент теплопроводности изоляции: 0,03 Вт/м·К (полиуритановая пена)

Диаметр трубки теплообменника:

25 мм

Радиус спирали теплообменника:

165 мм

Трубопровод: REHAU RAUTITAN flex
труба универсальная 25x3.5 мм

Диаметр трубопровода: 25 мм

Изоляция: Энергофлекс СУПЕР
25/20 мм

Толщина изоляции: 20 мм

Коэффициент теплопроводности
изоляции: 0,033 Вт/м·К

Циркуляционный насос: Циркуль

25/60

2. Потребитель:



Количество человек: 4

Максимальный суточный расход на человека: 80 л

3. *Климатические и географические условия:*

Населенный пункт: г. Иркутск

Географическая широта: 52°47'

Дата: 15 июня

Погодные условия: ясный день

Иркутск выбран в качестве точки наблюдения за численным экспериментом, так как находится в климатической зоне, богатой радиационными ресурсами.

Выбрано летнее время – июнь – так как в летние месяцы показатели наружных тепловых потерь незначительны. Если в результате эксперимента значения тепловых потерь в окружающую среду покажут себя как значимый фактор, значит и в зимнее время это фактор будет значимым в еще большей степени.

Работа системы моделировалась на временные интервалы, равные 5 минутам. Такая степень детализации позволяет с достаточной точностью моделировать ре-

жим работы насоса, а также достаточно подробно рассматривать процесс поступления и расхода энергии в системе.

Принятые выше обозначения основных факторов указаны в табл. 2, содержащей информацию о парах уровней, на которых может находиться фактор.

Уровень const означает, что данный параметр принимается постоянным. Для коэффициента теплопередачи K – это его паспортное значение; для физических свойств сред c и ρ – табличные значения, принимаемые по справочникам [11].

Уровень var означает, что в этом случае модель учитывает изменение значения параметра при изменении влияющих на него условий и вычисляется для каждого временного интервала.

Уровень 0 означает, что данный фактор принимается равным 0 и в модели он не учитывается.

Фактор находится на верхнем уровне, если его характеристикой является var и на нижнем, если его характеристикой является const или 0.

Таблица 2

Основные факторы и их уровни

Table 2

Main factors and their levels

№ / No.	Параметр / Parameter	Физическое обозначение / Physical symbol	Обозначение фактора / Factor symbol	Обозначение уровня / Level designation
1	Коэффициент теплопередачи теплообменника / Heat transfer coefficient of the heat exchanger	K	A	var/const
2	Физические свойства сред / Physical properties of media	c/ρ	B	var/const
3	Тепловые потери бака-аккумулятора и внутреннего трубопровода / Heat losses of the storage tank and internal pipeline	$Q_{\text{пот.вн}}$	C	var/0
4	Тепловые потери коллектора и наружного трубопровода / Heat losses of the collector and external pipeline	$Q_{\text{пот.нар}}$	D	var/0



Таким образом, число экспериментов, которые необходимо провести, составляет $2^4 = 16$. Поскольку подготовка к проведению каждого опыта является достаточно длительной, то на практике затруднительно ставить такое число опытов. В этом случае при планировании эксперимента обычно используют дробные планы, отбрасывающие взаимодействия высокого порядка и уделяющие наибольшее внимание главным эффектам [12].

Два эффекта факторов или взаимодействий образуют совместную пару, если при анализе невозможно установить различие между ними. Эксперимент типа $\frac{1}{2} \cdot 2^k$ представляет собой один блок эксперимента типа 2^k , образованный путем смешивания двух блоков (столбцы (2) и (3) табл. 3). Смешиваемое взаимодействие второго блока (3) является определяющим контрастом первого блока (2). Любой совместный эффект можно определить путем нахождения его обобщающего взаимодействия с определяющим контрастом путем умножения по модулю 2 [12]. Наличие в комбинации того или иного буквенного обозначения указывает на то, что в данной комбинации фактор рассматривается на верхнем уровне.

Таким образом, количество экспериментов сокращается до $\frac{1}{2} \cdot 2^4 = 8$.

Численный эксперимент и его результаты

Влияние факторов и их взаимодействий на точность модели оценивалось исходя из следующих выходных характеристик: время работы насоса (столбец I табл. 4), суммарное количество теплоты, переданное воде в баке (столбец II табл. 4), длительность периода обеспеченности потребителя водой с температурой $>33^\circ\text{C}$ (столбец III табл. 4). Заметим, что в табл. 4 представлены результаты проведенных численных экспериментов, а именно отношения средних квадратов рассматриваемых эффектов и их взаимодействий к остаточной сумме квадратов отбрасываемых

Упрощенный метод, разработанный Фрэнком Йетсом, представляет собой механический способ получения полных эффектов каждого фактора и их взаимодействий в

Таблица 3
Пары совместных эффектов
Table 3
Pares of synergetic effects

№/no.	Эффект / Effect	Совместный эффект / Synergetic effect
1	2	3
1.	ABCD	(I)
2.	BCD	A
3.	ACD	B
4.	CD	AB
5.	ABD	C
6.	BD	AC
7.	AD	BC
8.	D	ABC

эксперименте типа 2^k . Данный метод применим также и к дробным экспериментам. Метод служит для определения отношений средних квадратов, характеризующих значимость факторов и их взаимодействий. Подробное описание алгоритма Йетса в данной статье опущено, ниже представлены результаты экспериментов.

пар взаимодействий ($AB \equiv CD$, $AC \equiv BD$, $BC \equiv AD$). В последней строке таблицы указаны значения F-критерия, по которым определяется уровень значимости фактора (взаимодействия).

Результаты, представленные в табл. 4, могут быть интерпретированы следующим образом.

В вопросе оценки продолжительности работы насоса в течение рассматриваемого периода высоким уровнем значимости обладает фактор D – тепловые потери наружных элементов системы $Q_{\text{пот.нар}}$, Дж. Это может объясняться тем, что работа



Таблица 4

Отношения средних квадратов основных эффектов

Table 4

Ratio of mean squares of main effects

Фактор / Factor	Выходная характеристика / Output characteristic		
	I	II	III
A	1,2	11,9*	24,4*
B	0,0	0,3	4,8
C	0,1	0,1	6,1
D	43,4**	7,7	17,3*
Доверительные пределы для F / Confidence limits for F:	F _{1; 3; 0,90} = 5,54 F _{1; 3; 0,95} = 10,13 F _{1; 3; 0,99} = 34,12		

Примечание. Знак *, которым помечено значение отношений средних квадратов, указывает на значимое влияние фактора на соответствующую выходную характеристику. Знак ** указывает на то, что фактор обладает еще большей степенью влияния, то есть является высокосignificantным.

насоса состоит в своевременном отводе тепла с коллектора и переноса его с помощью теплоносителя потребителю. Величина тепловых потерь наружных элементов системы, а именно – коллектора, значительно выше тепловых потерь бака-аккумулятора и соразмерима с величиной расхода тепла из системы потребителем. Пренебрежение тепловыми потерями коллектора ведет к недоучету значительного количества теплоты, которое необходимо транспортировать от коллектора к потребителю. Таким образом, пренебрежение тепловыми потерями наружных элементов приводит к занижению времени работы насоса.

I. Суммарное количество теплоты, Дж, переданное воде в баке от теплоносителя с помощью теплообменника подвержено влиянию фактора А – коэффициент теплопередачи теплообменника K , Вт/м²·С. Значимость данного параметра объясняется непосредственным влиянием значения коэффициента теплопередачи на значения передаваемого количества теплоты от более нагретой среды к менее нагретой. Малая значимость наружных тепловых потерь в этом анализе может объясняться тем, что рассматриваемый процесс ограничивается пространством бака-аккумулятора, находящегося в помещении.

II. На длительность периода обеспеченности потребителя горячей водой оказывают влияние сразу два фактора: А и D, упомянутые в п.п. I и II. Значимость наружных тепловых потерь объясняется тем, что в уравнении баланса тепловой энергии в системе имеет достаточно высокое значение компонент тепловых потерь коллектора $Q_{\text{пот.кол}}$, величина которого сопоставима с величиной потребления тепла из системы. Изменение величины коэффициента теплопередачи теплообменника K непосредственно влияет на количество передаваемого воде в баке-аккумуляторе тепла и, соответственно, на ее температуру.

Фактор В – основные физические свойства сред – практически не оказывает влияния на точность математического моделирования работы ССТ.

Незначительное возрастание влияния фактора С – тепловые потери внутренних элементов системы (бака-аккумулятора и участков трубопроводов в помещении) – наблюдается при анализе обеспеченности потребителя горячей водой III. На практике тепловые потери резервуара действительно оказывают непосредственное влияние на температуру хранящейся в нем воды, но как показал анализ, при данных характеристиках оборудования влияние данного фактора не является значимым.



Заключение

Таким образом, на точность моделирования работы систем солнечного теплоснабжения для ГВС при рассмотренных условиях однозначно оказывают влияние значение тепловых потерь наружных элементов системы $Q_{\text{пот.нар}}$ и коэффициент теплопередачи теплообменника K . В связи

с этим рекомендуется производить моделирование работы систем солнечного теплоснабжения с учетом данных факторов и их изменения. Остальные параметры расчета существенного влияния на точность моделирования не оказывают, значит, ими допустимо пренебречь.

Библиографический список

1. Haller M.Y., Bertram E., Dott R., Afjei T., Carbonell D., Ochs F., Heinz A., Cao S., Siren K. Components and thermodynamic aspects, Solar and Heat Pump Systems for Residential Buildings. 2015.
2. Бондарев Ю.Л., Гильметдинов М.Ф., Карташев А.Л., Сафонов Е.В. Функциональная структура математической модели системы мультивалентного теплоснабжения на основе альтернативных и традиционных источников энергии // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2014. Т. 14. № 1. С. 23–28.
3. Ефремова О.А., Хворова Л.А. Математическое моделирование систем солнечного теплоснабжения // Известия Алтайского государственного университета. 2017. № 4. С. 98–103.
4. António J.M. Araújo Solar thermal modeling for rapid estimation of auxiliary energy requirements in domestic hot water production: Proportional flow rate control, Energy. 2017. No. 138. P. 668–681.
5. Карташев А.Л., Сафонов Е.В. и Карташева М.А. Разработка математической модели установки автономного теплообеспечения на основе солнечного термального коллектора // Вестник ЮУрГУ. 2011. Т. 34.
6. Кенисарин М.М., Лунд П.Д., Карабаев М.К. Численное моделирование централизованной солнеч-

- ной системы теплоснабжения с сезонным аккумулярованием тепла // Гелиотехника. 1988. № 2. С. 52–56.
7. Китайцева Е.Х., Константинова Д.А. Сравнительный анализ математических моделей систем солнечного теплоснабжения // Информационные системы, технологии и автоматизация в строительстве: сб. науч. тр. ИСТАС НИУ МГСУ. Москва, 2015. С. 87–90.
8. Китайцева Е.Х., Константинова Д.А. Численное моделирование работы теплообменных аппаратов в системах солнечного теплоснабжения // Бюллетень строительной техники. 2017. С. 30–32.
9. Planning software for photovoltaics, solar thermal, geothermal energy systems. Vela Solaris AG, [Электронный ресурс]. URL: <http://www.velasolaris.com/english/product/product-overview.html>. (30.01.2018).
10. Сарнацкий Э.В., Чистович С.А. Солнечное тепло- и холодоснабжение. Москва: Стройиздат, 1990. С. 324.
11. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. Москва: Наука, 1972.
12. Джонсон Н., Лион Ф., Статистика и планирование эксперимента в технике и науке / пер. с англ. Москва: Мир, 1981.

References

1. Haller M.Y., Bertram E., Dott R., Afjei T., Carbonell D., Ochs F., Heinz A., Cao S., Siren K. Components and thermodynamic aspects, Solar and Heat Pump Systems for Residential Buildings, 2015.
2. Bondarev Yu.L., Gil'metdinov M.F., Kartashev A.L., Safonov E.V. The functional structure of a mathematical model of the system based on a multivalent heating alternative and traditional energy sources. Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika [Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer Technologies, Management, Radio Electronics], 2014, vol. 14, no. 1, pp. 23–28. (In Russian).
3. Efremova O.A., Hvorova L.A. Mathematical modeling of solar heating systems. Izvestiya Altajskogo gosudar-

- stvennogo universiteta [Izvestiya of Altai State University], 2017, no. 4, pp. 98–103. (In Russian).
4. António J.M. Araújo Solar thermal modeling for rapid estimation of auxiliary energy requirements in domestic hot water production: Proportional flow rate control, Energy. 2017, no. 138, pp. 668–681.
5. Kartashev A.L., Safonov E.V., Kartasheva M.A. Development of a mathematical model of installation of self-contained heating based on solar thermal collector. Vestnik yuzhno-ural'skogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of the South Ural State University], 2011, vol. 34. (In Russian).
6. Kenisarin M.M., Lund P.D., Karabaev M.K. Numerical modeling of centralized solar thermal system with seasonal heat storage. Geliotekhnika [Applied Solar Energy], 1988, no. 2, pp. 52–56. (In Russian).



7. Kitajceva E.H., Konstantinova D.A. Sravnitel'nyj analiz matematicheskikh modelej sistem solnechnogo teplosnabzheniya [Comparative analysis of the mathematical models of solar heat supply systems]. Sbornik nauchnyh trudov ISTAS NIU MGSU "Informacionnye sistemy, tekhnologii i avtomatizaciya v stroitel'stve" [Collection of scientific articles of Moscow National Research State University of Civil Engineering "Information Systems, Technologies and Automation in Construction"]. Moscow, 2015, pp. 87–90. (In Russian).
8. Kitajceva E.H., Konstantinova D.A. Numerical simulation of the operation of heat exchangers in solar heating systems. Byulleten' stroitel'noj tekhniki [BST — Bulletin of Construction Equipment], 2017, pp 30–32. (In Russian).
9. Planning software for photovoltaics, solar thermal, geothermal energy systems. Vela Solaris AG [Про-

граммное обеспечение для планирования фотогальванических, солнечно-тепловых, геотермальных энергетических систем]. Available at: <http://www.velasolaris.com/english/product/product-overview.html> (accessed 30 January 2018).

10. Sarnackij E.V., Chistovich S.A. Solnechnoe teplo- i hladosnabzhenie [Solar Cool and Heat Supply Systems]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1990, 324 p. (In Russian).

11. Vargaftik N.B. Spravochnik po teplofizicheskim svojstvam gazov i zhidkostej [Handbook of physical properties of gases and liquids]. Moscow: Mir Publ., 1972 (In Russian).

12. Dzhonson N., Lion F. Statistics and experiment planning in engineering and science, 1981 p. (Russ. ed.: Statistika i planirovanie eksperimenta v tekhnike i nauke. Moscow, Mir Publ., 1981 p.).

Критерии авторства

Константинова Д.А. подготовила данную рукопись и несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Authorship criteria

Konstantinova D. A. has prepared the manuscript for publication and bears the responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.