

## РАЗРАБОТКА МАКЕТА ОПЫТНОГО СОЛНЕЧНОГО ТЕРМАЛЬНОГО КОЛЛЕКТОРА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО ХАРАКТЕРИСТИК\*

*А.Л. Карташев, Е.В. Сафонов, А.О. Шульц, М.А. Карташева  
г. Челябинск, Южно-Уральский государственный университет*

## A PROTOTYPE OF EXPERIMENTAL SOLAR THERMAL COLLECTOR DESIGN AND STUDY OF ITS CHARACTERISTICS

*A.L. Kartashev, E.V. Safonov, A.O. Shulz, M.A. Kartasheva  
Chelyabinsk, South Ural State University*

Разработан и изготовлен макет опытного солнечного термального коллектора. Разработаны программа и методика проведения испытаний макета опытного солнечного термального коллектора. Разработан и изготовлен стенд для проведения испытаний солнечного термального коллектора. Проведено численное и экспериментальное моделирование гидродинамических и тепловых режимов солнечного термального коллектора.

*Ключевые слова:* макет опытного солнечного термального коллектора, программа и методика испытаний, стенд для испытаний солнечного термального коллектора, моделирование гидродинамических и тепловых режимов.

The prototype of experimental solar thermal collector is designed and produced. Program and testing procedure of experimental solar thermal collector are worked out. A display stand for solar thermal collector testing is designed and produced. Numerical and experimental simulation of hydrodynamic and thermal regimes of solar thermal collector is carried out.

*Keywords:* an experimental solar thermal collector prototype, a program and testing procedure, a display stand for testing of solar thermal collector, simulation of hydrodynamic and thermal regimes.

### 1. Макет опытного солнечного термального коллектора

Разработка макета опытного солнечного термального коллектора проведена в соответствии с эскизным проектом в рамках Государственного контракта № 16.516.11.6054 от 28 апреля 2011 года на выполнение научно-исследовательских работ по теме: «Создание установки энергоснабжения на основе термального солнечного коллектора с системой аккумулирования тепловой энергии, мониторинга и управления тепловыми режимами здания» [1].

Солнечный термальный коллектор предназначен для нагрева жидкого теплоносителя от воспринимающей панели абсорбера за счет преобразования широкого спектра солнечного излучения в теплоту на зачерненных пластинах абсорбера. Область применения солнечного термального коллектора – системы теплообеспечения и горячего водоснабжения на альтернативных источниках энергии, в том числе как авто-

номные системы теплообеспечения, так и комбинированные, в составе которых используются другие источники энергии.

Солнечный термальный коллектор включается в замкнутую систему непрямого нагрева, использующую накопительный бак-аккумулятор. При работе в коллекторном контуре необходимо устанавливать мембранный расширительный бак для компенсации увеличения объема теплоносителя при нагреве и предохранительный клапан для предохранения коллектора от роста давления свыше рабочего. В установках солнечного теплообеспечения необходимо использовать водяные насосы для систем отопления и горячего водоснабжения зданий. Между выходом из коллектора и баком-аккумулятором должен быть размещен возвратный клапан для предотвращения обратной циркуляции теплой воды.

При размещении солнечного коллектора необходимо обеспечить южную ориентацию с учётом следующего: отклонение от южной ориента-

\* Работа выполнена в рамках Государственного контракта № 16.516.11.6054 Министерства образования и науки Российской Федерации.

## Альтернативные источники энергии

ции на восток до  $15^\circ$  ведет к уменьшению прихода солнечной радиации на 5 %, отклонение на запад до  $30^\circ$  – на 10 %. Угол наклона солнечных коллекторов к горизонту при круглогодичной работе установки должен быть равным широте местности для солнечного горячего водоснабжения (ГВС) и  $\varphi + 15^\circ$  – для солнечного теплоснабжения.

Срок непрерывной работы установки до регламентного технического обслуживания устанавливается при проведении приемосдаточных испытаний в зависимости от циклограммы работы установки, от сезона эксплуатации и прочих, специально оговариваемых условий, и составляет не менее 15 лет.

Макет опытного солнечного термального коллектора изготовлен согласно эскизной конструкторской документации и его общий вид представлен на рис. 1 [1]. Габаритные размеры солнечного термального коллектора составляют  $1224 \times 1220 \times 93$  мм.

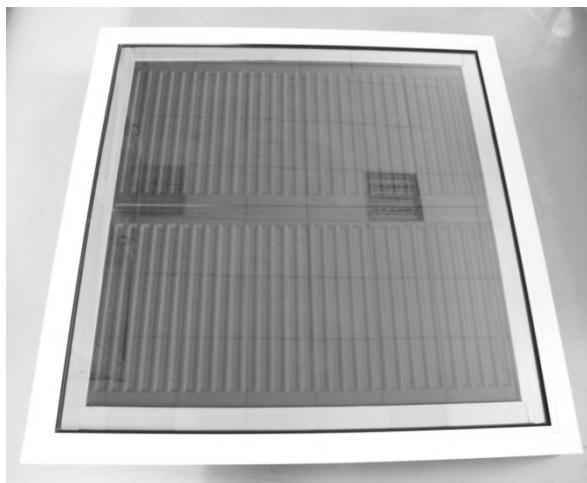


Рис. 1. Макет опытного солнечного коллектора в сборе

Стальной абсорбер собран из двух стальных штампованных панелей. Между собой панели закреплены патрубком и стальными пластинами при помощи сварки. Затем абсорбер окрашивается с одной стороны черной матовой краской для лучшего поглощения солнечного тепла, а с обратной (тыльной) стороны – белой краской.

### 2. Программа и методика испытаний макета опытного солнечного термального коллектора

Программа и методика испытаний [2] предназначена для проведения исследовательских испытаний солнечного термального коллектора и разработана с учетом требований ГОСТ Р 15.201–2000 «Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство».

Программа и методика испытаний определяет объем, последовательность и методику проведения исследовательских испытаний солнечного термального коллектора, критерии успешности их выполнения и необходимые меры безопасности. Исследовательские испытания проводятся с целью оценки соответствия солнечного термального коллектора основным характеристикам и требованиям, установленным в техническом задании. После окончания испытаний, при условии соответствия всех параметров, определяемых по программе и методике испытаний, требованиям технического задания, солнечный термальный коллектор считается выдержавшим испытания.

Программа проведения испытаний определяет: средства проведения испытаний, условия проведения испытаний, процесс подготовки к испытаниям, требования к персоналу, требования безопасности при подготовке изделия к испытаниям, требования безопасности при проведении испытаний.

Методика проведения испытаний включает: проверку технической документации на солнечный термальный коллектор, проверку его комплектности, проверку покрытия поверхностей солнечного термального коллектора, определение его веса, проверку эффективности поглощательной поверхности, определение оптического коэффициента полезного действия и коэффициента эффективности поглощающей панели, определение поглощательной способности покрытия поглощающей панели, определение степени черноты поглощающей поверхности, определение пропускательной способности прозрачной изоляции относительно солнечного излучения и гидравлические испытания солнечного термального коллектора.

### 3. Испытания макета опытного солнечного термального коллектора

Стенд для испытаний и порядок их проведения

Стенд тепловых и гидравлических испытаний представляет собой экспериментальную установку, состоящую из гидравлической, воздушной и электрической частей, а также климатической камеры с установленным в ней испытуемым солнечным коллектором. Внешний вид стенда приведен на рис. 2.

Климатическая камера представляет собой теплоизолированный корпус с отражающими свет и тепловое излучение стенками, в котором установлены солнечный коллектор и люминесцентные лампы с дневным спектром излучения электрической мощностью до 1,5 кВт с системой кондиционирования воздуха для управления температурными и влажностными режимами, соответствующими различным условиям функционирования солнечного термального коллектора.

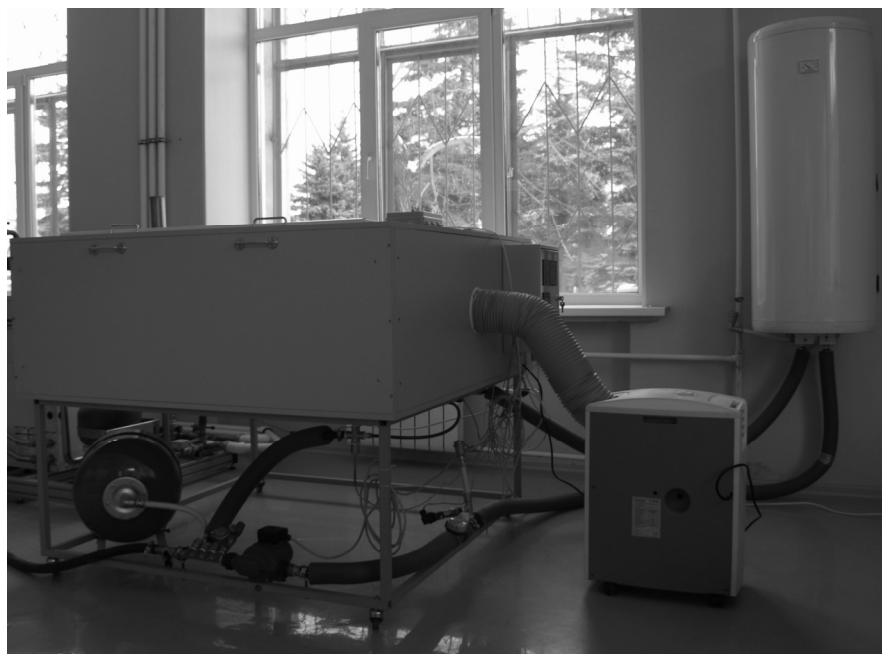


Рис. 2. Стенд испытаний солнечных термальных коллекторов

Корпус установлен на подвижной металлической раме, на которой также смонтированы элементы пневмогидравлической схемы.

Воздушная часть состоит из электрического вытяжного канального вентилятора и холодильного агрегата воздуха, который представляет собой моноблок для охлаждения воздуха. Этот агрегат необходим для охлаждения воздуха внутри камеры, который нагревается при работе ламп.

Электрическая часть содержит следующие узлы и элементы: блок индикации и управления; датчики температуры; датчики давления и перепада давления; регулируемый центробежный насос; канальный вытяжной вентилятор; блок люминесцентных ламп.

Панель управления стенда с электронными цифровыми индикаторами и элементами управления, расположенная на боковой стенке климатической камеры, представлен на рис. 3. На индикаторах отражаются величины температуры, давления и перепада давления в различных точках стенда. От щита разведены силовые и измерительные кабели. Питание щита – 220 В, 50 Гц.

Блок люминесцентных ламп расположен на нижней стороне крышки климатической камеры. Он состоит из ряда люминесцентных ламп, которые включаются группами с целью ступенчатого регулирования светового излучения.

Работа на стенде производится в следующем порядке:

- заправка стенда жидким теплоносителем (дана в описании работы пневмогидравлической схемы);
- включение насоса и установление необходимого расхода теплоносителя;

- установление необходимой плотности светового потока (количеством включенных ламп);
- установление (в течение некоторого времени) стабильной температуры в климатической камере при помощи регулирования расхода входящего холодного воздуха;
- установление стабильного перепада температур теплоносителя на входе и на выходе солнечного коллектора (выход на режим);
- периодическое проведение замеров температур и давлений в системе.



Рис. 3. Панель управления стенда

В процессе работы стенда измерения производятся в следующем порядке:

- расход теплоносителя через коллектор;
- мощность светового потока ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) при помощи пиранометра;

## Альтернативные источники энергии

- значения температур теплоносителя на входе и на выходе солнечного коллектора;
- температура окружающего воздуха и воздуха на выходе из климатической камеры;
- перепад давлений теплоносителя на патрубках солнечного коллектора и давление в системе.

Результаты испытаний  
солнечного термального коллектора

В ходе проведенных испытаний получены следующие результаты [3].

### Проверка эффективности поглощательной способности

1. Определение произведения оптического КПД коллектора и коэффициента эффективности поглощающей панели (табл. 1, 2).

Теплопроизводительность коллектора ( $Q_k$ ) рассчитывается по [2, формулы (2)– (3)]. Результаты представлены в табл. 3.

### Результаты гидравлических испытаний солнечного термального коллектора

Гидравлические испытания солнечного термального коллектора проведены при следующих условиях:

- 1) схема испытательного стенда: замкнутая;
- 2) условия испытаний:
  - габаритная площадь коллектора:  $1\text{ м}^2$ ;
  - теплоноситель: вода;
  - температура теплоносителя в «холодной серии»:  $21^\circ\text{С}$ ;
  - температура теплоносителя в «горячей серии»:  $40^\circ\text{С}$ .

Результаты измерений  $\Delta P$  и расчета коэффи-

циента гидравлического сопротивления  $\xi$  числа Рейнольдса  $Re$  (табл. 4).

## 4. Моделирование гидродинамических и тепловых режимов работы солнечного термального коллектора

Численное моделирование гидродинамических и тепловых режимов работы солнечного термального коллектора

Численное моделирование процессов, протекающих при работе солнечного термального коллектора, проводилось в приложении FlowSimulation программного пакета SolidWorks 2010.

Для проведения численного моделирования создана трехмерная модель макета опытного солнечного термального коллектора, выбраны свойства для материалов элементов коллектора. Затем проведено численное моделирование при заданных значениях солнечной радиации, расходе теплоносителя и свойствах поглощающей поверхности абсорбера.

Материал поглощающей панели – сталь 3, материал рамы коллектора – алюминиевый сплав АД, материал теплоизоляции – пеноплэкс-35 толщиной 40 мм. В качестве прозрачной теплоизоляции использовано обычное оконное стекло, толщина 4 мм. Поглощающая панель изготовлена из штампованных сваренных между собой панелей с параллельными каналами, со стороны приема солнечного излучения окрашена в черный матовый цвет в один слой, со стороны теплоизоляции – в белый цвет. Площадь тепловоспринимающей поверхности равна  $1\text{ м}^2$ .

Таблица 1

Температура воды на входе в коллектор, $^\circ\text{С}$	Температура окружающего воздуха, $^\circ\text{С}$	Скорость ветра, м/с	Температура воды на выходе из коллектора, $^\circ\text{С}$	Расход воды через коллектор, кг/ч
30	22,4	2	30,9	0,024
35	24,3	2	35,8	0,024
40	23,9	2	40,7	0,024

Таблица 2

Температура воды на входе в коллектор, $^\circ\text{С}$	Плотность потока суммарной солнечной радиации в плоскости коллектора, $\text{Вт/м}^2$	Температура окружающего воздуха, $^\circ\text{С}$	Скорость ветра, м/с	Температура воды на выходе из коллектора, $^\circ\text{С}$	Расход воды через коллектор, кг/ч
20	236	21,8	2	20,6	0,049
30	284	23,5	2	31,3	0,024
40	284	26,1	2	41,2	0,028

Таблица 3

$Q_k = \frac{G \cdot C_p}{A} (t_{\text{ВЫХ}} - t_{\text{ВХ}}) \tau_0$	441,7 кДж	468,9 кДж	504,9 кДж
$\frac{1}{E} \left( \frac{t_{\text{ВХ}} + t_{\text{ВЫХ}}}{2} - t_{\text{В}} \right)$	-0,006	0,025	0,051

Результаты численного моделирования характеристик макета опытного солнечного коллектора приведены в табл. 5.

В качестве источника излучения задавалось радиационное излучение с удельной мощностью 300 Вт/м<sup>2</sup>. Моделирование проводилось для трех видов поверхности: абсолютно черного тела, черной лакированной стальной поверхности и листовой стали. Массовый расход задавался с разницей в 10 раз.

Так как абсолютно черного тела не существует, первые два расчета показывают гипотетический случай. Однако результаты этих расчетов можно использовать для сравнения с реальными поверхностями.

Следующие два расчета подразумевают использование стальной поверхности адсорбера,

покрытой черным лаком. При этом, как видим, тепловая эффективность коллектора при расходе теплоносителя 0,022 кг/с равна  $(238,14/300) = 0,794$ , т. е. 79,4 %. Это хороший результат при использовании данных материалов, однако нужно учесть, что в реальности эффективность будет ниже за счет неидеальности поверхности, дополнительных тепловых потерь из-за недостатков конструкции и т.д.

Последние два коллектора подразумевают использование обычной стальной матовой серой поверхности адсорбера. При этом, как видим, тепловая эффективность коллектора при расходе теплоносителя 0,022 кг/с равна  $(199,395/300) = 0,665$ , т. е. 66,5 %. Эффективность достаточна для практического применения, однако при выборе реальных материалов она будет ниже.

Таблица 4

№ п.п.	«Холодная серия»				«Горячая серия»			
	Расход теплоносителя, кг/(м <sup>2</sup> · с)	Потери давления ΔP, Па	ξ	Re	Расход теплоносителя, кг/(м <sup>2</sup> · с)	Потери давления, ΔP, Па	ξ	Re
1	0,049	5040	13,28	1,3×10 <sup>4</sup>	0,049	5360	14,12	2×10 <sup>4</sup>
2	–	–	–	–	0,024	1020	11,2	9800
3	–	–	–	–	0,028	1300	10,49	11430

Таблица 5

Удельная мощность радиационного излучения W <sub>из</sub> , Вт/м <sup>2</sup>	Массовый расход m, кг/с	Температура на входе в коллектор T <sub>вх</sub> , К	Температура на выходе из коллектора T <sub>вых</sub> , К	Перепад температуры на коллекторе dT, К	Выдаваемая тепловая мощность коллектора W, Вт	Поверхность адсорбера	Характеристика поверхности (коэффициенты излучения и поглощения)
300	0,00225	293,2	313,28	20,08	189,756	Black body wall (абсолютно черное тело)	Emissivity coefficient 1,0
300	0,0225	293,2	296,2	3	283,5		Solar absorptance 1,0
300	0,00225	293,2	310,9	17,7	167,265	Shellack black shiny on tinned iron sheet (черный лак на металле)	Emissivity coefficient 0,82
300	0,0225	293,2	295,72	2,52	238,14		Solar absorptance 0,82
300	0,00225	293,2	308,48	15,28	144,396	Still rolled sheet (сталь листовая)	Emissivity coefficient 0,66
300	0,0225	293,2	295,31	2,11	199,395		Solar absorptance 0,66

№ опыта	Удельная мощность радиационного излучения, $W_{из}$ , Вт/м <sup>2</sup>	Массовый Расход, $m$ , кг/с	Средний перепад температуры на коллекторе, $dT$ , К	Выдаваемая тепловая мощность коллектора, $W$ , Вт	Перепад давления на коллекторе $dP$ , кПа	Тепловая эффективность коллектора $W/W_{из}$
1	236	0,049	0,6	123,5	5,4	0,523
2	236	0,024	1,2	121	1,0	0,513
3	284	0,024	1,4	141	1,0	0,496
4	284	0,028	1,2	142	1,3	0,5

Экспериментальное моделирование гидродинамических и тепловых режимов работы солнечного термального коллектора

Экспериментальное моделирование (натурный эксперимент) проводилось на стенде тепло-гидравлических испытаний солнечного термального коллектора. В качестве объекта испытаний выступает макет опытного солнечного термального коллектора, представленный на рис. 2, использующий в качестве абсорбера два стальных коллектора из штампованных листов, соединенных между собой последовательно по линии теплоносителя. Конструкция коллектора соответствует приложенной эскизной конструкторской документации, а также повторяет конструкцию коллектора, использованного для численного моделирования, вплоть до теплофизических свойств материалов конструкции коллектора и теплоносителя. Коллектор располагается на стенде горизонтально. Температура воздуха, окружающего коллектор, поддерживается на уровне комнатной (22–24 °С) с помощью климатической установки.

Результаты испытаний макета солнечного коллектора на стенде приведены в табл. 6.

Как видно из результатов экспериментального моделирования, реальный солнечный коллектор уступает по тепловой эффективности аналогичной математической модели. Однако показатель эффективности порядка 50 % – достаточно высокое значение для обычного солнечного коллектора с относительно невысокой стоимостью изготовления. Таким образом, результаты испытаний подтверждают основные выводы результатов численного моделирования.

Дальнейшее увеличение тепловой эффективности связано с применением более теплопроводных материалов для абсорбера (медь, алюминий), применения селективных покрытий, энергосберегающих стекол, современной теплоизоляции.

Однако необходимо учитывать соотношение «цена–качество», так как зачастую прибавка в эффективности 10 % равна прибавке в стоимости 50 % и более. И в таком случае стоит рассмотреть вариант обычного увеличения площади солнечных панелей (если позволяет компоновка и площадь для размещения) в ущерб тепловой эффективности.

### Заключение

1. Разработан и изготовлен макет опытного солнечного термального коллектора для исследования его технических характеристик.

2. Разработаны программа и методика испытаний макета опытного солнечного термального коллектора.

3. Разработан и изготовлен стенд для проведения испытаний солнечного термального коллектора, определены поглощательная способность солнечного термального коллектора и проведены его гидравлические испытания.

4. Проведено численное и экспериментальное моделирование гидродинамических и тепловых режимов солнечного термального коллектора, определена энергетическая эффективность солнечного термального коллектора и предложены направления для ее повышения.

### Литература

1. Эскизный проект солнечного термального коллектора / А.Л. Карташев, Е.В. Сафонов, М.А. Карташева и др. // Приложение к отчету о научно-исследовательской работе по теме: «Создание установки энергоснабжения на основе термального солнечного коллектора с системой аккумуляции тепловой энергии, мониторинга и управления тепловыми режимами здания». Этап № 2 / ФГБОУ ВПО ЮУрГУ. – Челябинск, 2011. – 19 с.

2. Программа и методика испытаний солнечного термального коллектора / А.Л. Карташев, Е.В. Сафонов, М.А. Карташева и др. // Приложение к отчету о научно-исследовательской работе по теме: «Создание установки энергоснабжения на основе термального солнечного коллектора с системой

аккумуляции тепловой энергии, мониторинга и управления тепловыми режимами здания». Этап № 2 / ФГБОУ ВПО ЮУрГУ. – Челябинск, 2011. – 26 с.

3. Протокол испытаний макета опытного солнечного термального коллектора / ФГБОУ ВПО ЮУрГУ. – Челябинск, 2011. – 5 с.

*Поступила в редакцию 15.01.2012 г.*

**Карташев Александр Леонидович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Двигатели летательных аппаратов», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Область научных интересов – математическое моделирование и проектирование энергетических установок и сложных технических систем, исследование гидрогазодинамических процессов и процессов теплообмена в технических системах. Контактный телефон: 8-(351)-267-92-65.

**Kartashev Alexander Leonidovich** is a Doctor of Science (Engineering), a Professor of Aircraft Engines Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: mathematical simulation and design of power installations and complex engineering systems, hydrogasdynamic processes and heat transfer processes in engineering systems study. Telephone: 8-(351)-267-92-65.

**Сафонов Евгений Владимирович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Двигатели летательных аппаратов», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Область научных интересов – проектирование энергетических установок, математическое моделирование гидрогазодинамических и тепловых процессов в технических системах. Контактный телефон: 8-(351)-267-92-65.

**Safonov Evgeney Vladimirovich** is a Candidate of Science (Engineering), an associate professor of Aircraft Engines Department of South Ural State University. Research interests: power installations design, mathematical simulation of hydrogasdynamic and heat processes in engineering systems. Telephone: 8-(351)-267-92-65.

**Шульц Алексей Оттович** – заведующий лабораторией кафедры «Двигатели летательных аппаратов», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Область научных интересов – проектирование энергетических установок, экспериментальные исследования энергетических систем. Контактный телефон: 8-(351)-267-92-65.

**Shulz Alexey Ottovich** is a Chief of laboratory of Aircraft Engines Department of South Ural State University. Research interests: power installations design, experimental research of engineering systems. Telephone: 8-(351)-267-92-65.

**Карташева Марина Анатольевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Летательные аппараты и автоматические установки», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Область научных интересов – математическое моделирование и проектирование энергетических установок и сложных технических систем, исследование гидрогазодинамических процессов и процессов теплообмена в технических системах. Контактный телефон: 8-(351)-267-94-61.

**Kartasheva Marina Anatolyevna** is a Candidate of Science (Engineering), an associate professor of Aircrafts and Automated Installations Department of South Ural State University. Research interests: mathematical simulation and design of power installations and complex engineering systems, hydrogasdynamic processes and heat transfer processes in engineering systems study. Telephone: 8-(351)-267-94-61.