

# Анализ и измерение воздействия солнечного излучения на фары автомобилей<sup>1</sup>

Э. ЁЗТЮРК<sup>1</sup>, М. АКТАС, Т. ШЕНЬЮЗ

Компания *Magneti Marelli Mako Elektrik Sanayi Ve Ticaret A.Ş.*, Бурса, Турция

<sup>1</sup>E-mail: emre.ozturk@magnetimarelli.com

## Аннотация

Целью данного исследования являлось обеспечение хорошей корреляции между результатами моделирования воздействия солнечного излучения на фары автомобилей и измерений, проводившихся с использованием сфокусированного солнечного излучения. Свет солнца, лучи которого параллельны друг другу (коллимированный свет), можно фокусировать при помощи выпуклых линз. Сфокусированное излучение вызывает появление горячих точек на окружающих линзу пластмассовых деталях, что может привести к обусловленным их плавлением отказам в высокотемпературных зонах. Моделирование воздействия солнечного излучения производится для исключения опасности обесцвечивания, деформации, выделения газов, разрушения покрытий и воспламенения при большой продолжительности этого воздействия. Облучённость рассматривается при моделировании как источник тепла, интенсивность которого зависит от угла падения солнечного излучения. На первом этапе моделирование осуществляется с шагом 5°, что позволяет определить критичные участки, а затем шаг уменьшается до 2°, чтобы выявить критичные значения азимутального угла и угла наклона. Критичные значения этих углов определяются при помощи трассировки лучей, позволяющей учесть отражение солнечных лучей и найти конструктивные решения, позволяющие избежать их фокусирования. По окончании численного анализа, направленного на ослабление воздействия солнечного излучения на фары автомобилей, необходимо провести соответствующие измерения. Измерения проводились с использованием тепловизора и имитатора чрезвычайно высококоллимированного солнечного излучения при всех критичных углах, которые были получены в результате моделирования. Проведено сравнение результатов моделирования и измеренных значений температуры, в которые были внесены поправки на условия окружающей среды.

**Ключевые слова:** воздействие солнечного излучения, автомобильные фары, горячая точка, зажигательное стекло, гидродинамическое моделирование.

## 1. Введение

Известно, что солнечный свет, будучи сфокусирован, приводит к плавлению материалов. Экспериментальные исследования повреждений, вызываемых воздействием солнечного света, проводились с использованием простых увеличительных стёкол, и наблюдавшиеся при этом результаты получили название «эффект зажигательного стекла» (*burning glass effect*). В отличие от излучения

других источников света, солнечные лучи благодаря своей параллельности могут фокусироваться линзами (рис. 1а) [1]. Увеличение количества применяемых в автомобильной промышленности линз и пластмасс сопровождалось увеличением количества повреждений, вызванных новыми разновидностями эффекта зажигательного стекла. Для формирования требуемого светораспределения в случае светодиодов (СД) и разрядных ламп высокого давления (РЛВД), используемых в высокотехнологичных автомобильных фарах, следует обеспечить малые фокусные расстояния [2, 3]. А это приводит к нежелательному фокусированию света на пластмассовых декоративных деталях, которые окружают линзы. Подобное фокусирование приводит к тому, что при длительной эксплуатации эти детали обесцвечиваются, деформируются, выделяют газы и обгорают.

В зависимости от угла падения излучения, оно может фокусироваться на передних или задних поверхностях (рис. 1б). По этой причине, используемые в фарах автомобилей линзы следует исследовать на предмет последствий воздействия солнечного излучения.

## 2. Материалы и метод

Были исследованы различные типы излучателей (рис. 2) и фасетных отражателей (*shell reflector*) (рис. 3), которые часто используются для размещения источников света в современных фарах.

Свет может фокусироваться на декоративных деталях, окружающих линзы излучателей или фасетные отражатели. Местоположение точки фокусировки зависит от внутренней конструкции фары и от характеристик её компонентов (покрытий, углов наклона поверхностей и т.д.).

В рамках первого исследования фары автомобиля (рис. 4) нами были рассмотрены крышка, тубус и фиксирующая РЛВД маска, которые не покрыты алюми-

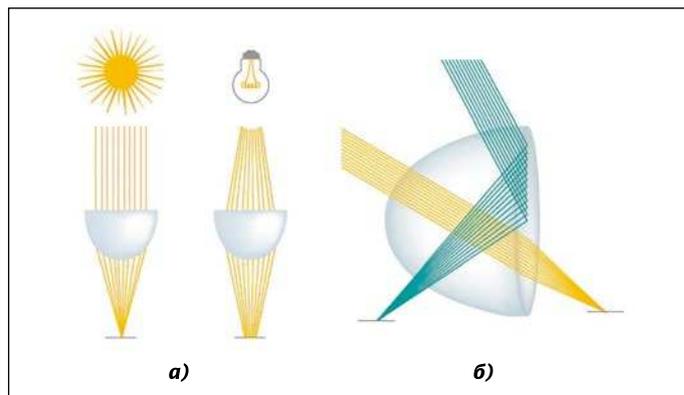


Рис. 1. Фокусирование солнечного света (а) и фокусирование света на передней и задней поверхностях (б)

<sup>1</sup> Перевод с англ. Е.И. Розовского



Рис. 2. Излучатели

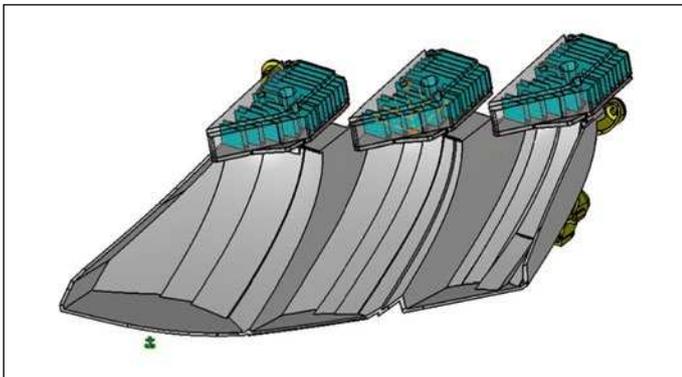


Рис. 3. Факетный отражатель

ем и имеют чёрный цвет. В рамках второго исследования фары автомобиля (рис. 5) нами была рассмотрена чёрная прокладка, представляющая собой декоративную деталь, закрывающую факетный отражатель.

В соответствии с требованиями, предъявляемыми покупателями, были идентифицированы те компоненты, которые могут оказаться под угрозой при воздействии на них солнечного света. Вначале с использованием трассировки лучей были проведены тепловые расчёты и определены критические значения углов, а затем было проведено моделирование теплового режима применительно к изменениям температуры, с тем чтобы определить предельно допустимые условия работы. Полученные расчётным путём критические значения углов были проверены экспериментально, после чего было проведено сравнение расчётных и экспериментальных результатов.

## 2.1. Теоретическое рассмотрение

В рамках теории атмосферной массы (*theory of air mass*), плотность потока прямого солнечного излучения (в приближении чистого воздуха) можно записать, как:

$$I_{direct} = I_0 \cdot 0,76^{AM^{0,618}}, \quad (1)$$

где  $I_0 = 1353 \text{ Вт/м}^2$  – солнечная постоянная,  $AM \geq \sim 0,5 \text{ кг}$  – атмосферная масса<sup>2</sup>.

Атмосферная масса, которая зависит от высоты над уровнем моря  $h$  и зенитного угла Солнца  $\gamma$ , определялась

<sup>2</sup> Т. к. атмосферная масса, которую правильнее было бы назвать приведённой толщиной атмосферы,  $AM$  представляет собой отношение оптической длины пути при прохождении солнечного излучения через атмосферу к её минимальному значению (солнце в зените), то, во-первых, это величина безразмерная, и во-вторых,  $AM \geq 1$ . – Прим. пер.

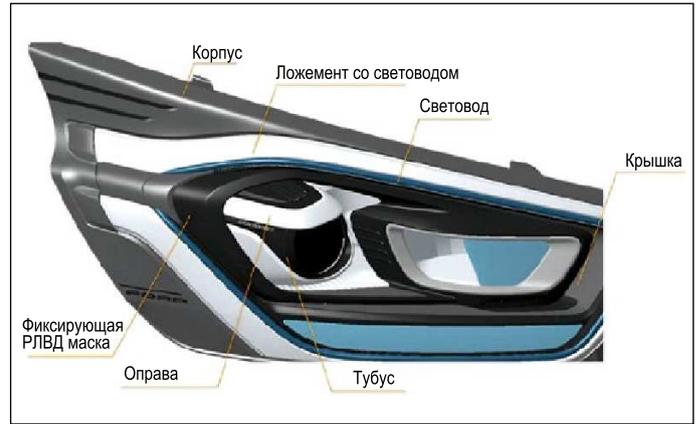


Рис. 4. Исследование, проведённое применительно к излучателю

согласно [4], тогда как радиус Земли  $r_{earth}$  и толщина атмосферы  $h_{atm}$  считались равными, соответственно, 6378 и 8,7 км.

Исследования проводились применительно к широте  $0^\circ$ , 21-му марта или 21-му сентября и зенитным углам, лежащим в интервале  $0-90^\circ$ . Приборы, используемые для измерения потока солнечного излучения, помещаются на высоте  $h = 2 \text{ км}$  над уровнем моря, так что расчёты проводились на основе данных, полученных для этой высоты. Облучённость, которая зависит от зенитного угла, была рассчитана и использовалась в качестве входного параметра при проведении тепловых расчётов.

Численное моделирование осуществлялось применительно к стационарным условиям, а поток воздуха считался ламинарным. При проведении расчётов использовались все узловые точки теплопередачи. Основные уравнения, включающие в себя уравнение неразрывности, уравнение сохранения импульса и уравнение сохранения энергии для стационарного воздушного потока в условиях естественной конвекции, могут быть записаны на основе уравнений (2) – (6). Уравнение (7) решается численно применительно к твердотельным участкам без источников тепла. Соответствующие уравнения не могут быть сжаты (*compressed*) в прямоугольной системе координат, но если воспользоваться подходом Буссинеска, то для стационарного потока их можно записать, как:

$$\partial u/\partial x + \partial v/\partial y + \partial w/\partial z = 0, \quad (2)$$

$$u \cdot \partial u/\partial x + v \cdot \partial u/\partial y + w \cdot \partial u/\partial z = -1/\rho \cdot \partial p/\partial x + v \cdot (\partial^2 u/\partial x^2 + \partial^2 u/\partial y^2 + \partial^2 u/\partial z^2), \quad (3)$$

$$u \cdot \partial v/\partial x + v \cdot \partial v/\partial y + w \cdot \partial v/\partial z = -1/\rho \cdot \partial p/\partial y + v (\partial^2 v/\partial x^2 + \partial^2 v/\partial y^2 + \partial^2 v/\partial z^2), \quad (4)$$

$$u \cdot \partial w/\partial x + v \cdot \partial w/\partial y + w \cdot \partial w/\partial z = -1/\rho \cdot \partial p/\partial z + v (\partial^2 w/\partial x^2 + \partial^2 w/\partial y^2 + \partial^2 w/\partial z^2) + g \cdot \beta \cdot (T - T_\infty), \quad (5)$$

$$u \cdot \partial T/\partial x + v \cdot \partial T/\partial y + w \cdot \partial T/\partial z = \alpha \cdot (\partial^2 T/\partial x^2 + \partial^2 T/\partial y^2 + \partial^2 T/\partial z^2), \quad (6)$$

$$\partial^2 T/\partial x^2 + \partial^2 T/\partial y^2 + \partial^2 T/\partial z^2 + q/k = 0, \quad (7)$$

где  $u$ ,  $v$  и  $w$  – составляющие вектора скорости, м/с;  $\alpha$  – коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\beta$  – коэффициент объёмного расширения;  $g$  – ускорение свободного падения,

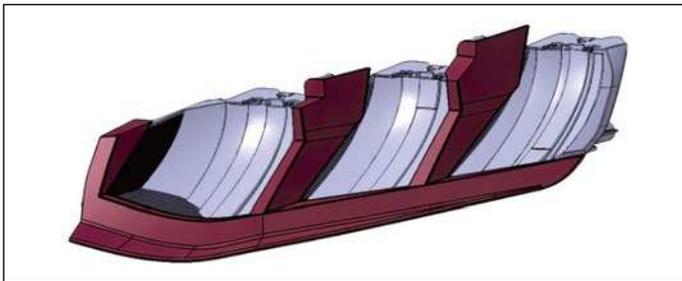


Рис. 5. Исследование, проведённое применительно к факетному отражателю

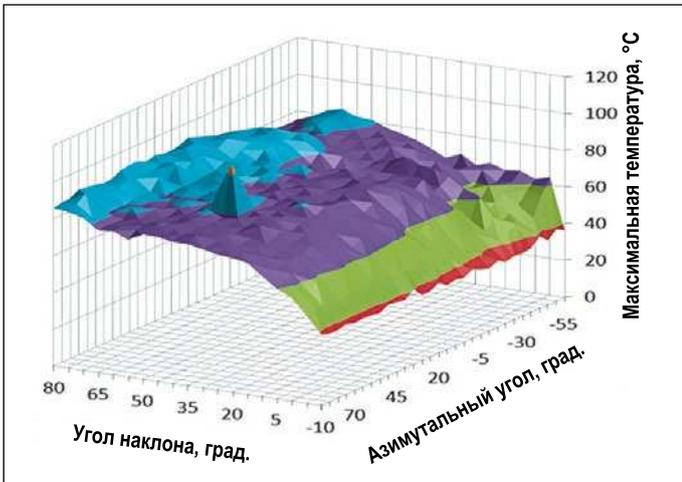


Рис. 6. Результаты моделирования с шагом 5°

$m/c^2$ ;  $T$  – температура, °C;  $\rho$  – плотность жидкости в области проведения расчётов,  $kg/m^3$ ;  $k$  и  $q'$  – коэффициенты теплопроводности,  $Вт/(м·K)$ . Для всех составляющих вектора скорости на всех стенках выполняется условие отсутствия проскальзывания, и граничные условия записываются следующим образом:

Скорость: на всех стенках  $u = v = w = 0$  м/с.

Давление: на сферической поверхности  $p = 1$  атм.

Температура окружающей среды:  $T = T_{\infty} = 23$  °C.

В данной работе, как и в других аналогичных исследованиях, использовался метод Монте-Карло, что обусловлено обеспечиваемой им устойчивостью численного решения уравнений и точностью расчётов переноса тепла излучением [5].

С учётом возможного наклона автомобиля на 10°, диапазоны сканирования составляли от -90 до 90° в случае азимутального угла и от -10 до 100° в случае угла наклона.

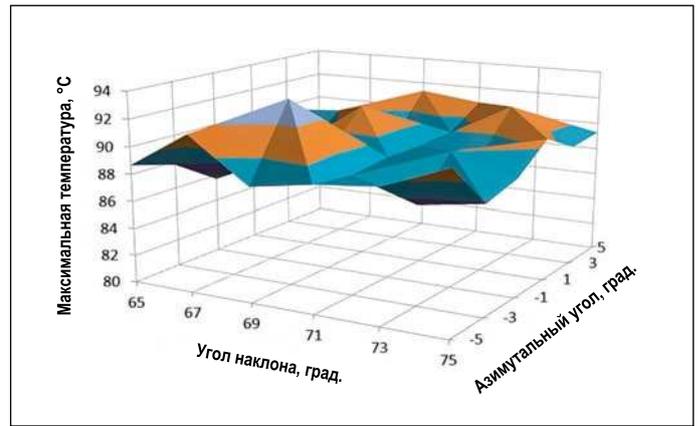


Рис. 7. Результаты моделирования с шагом 2°

Вначале был проведён термический анализ с шагом 5°, в результате которого применительно к температуре деталей были определены критичные угловые диапазоны (рис. 6).

На основе этих результатов, которые были получены с шагом 5°, был определён новый диапазон углов сканирования, применительно к которому был проведён термический анализ с шагом 2°, позволивший более точно определить значения углов (рис. 7).

После определения точных значений углов, соответствующих пиковым значениям результатов, которые были получены с шагом 2°, термический анализ был осуществлён повторно применительно к равной 80 °C температуре окружающей среды, что позволило максимально смоделировать наиболее жёсткие условия эксплуатации.

### 3. Результаты

#### 3.1. Расчёты

Завершающее моделирование теплового режима было проведено применительно к уточнённым по результатам 2-градусного анализа значениям углов. Результаты, полученные применительно ко всем представляющим интерес деталям, приведены в табл. 1.

В случае тубуса (рис. 8), который имеется в излучателе, оказалось, что критичное направление задаётся равным 86° азимутальным углом и равным 35° углом наклона. Моделирование теплового режима было проведено для температуры окружающей среды 80 °C применительно именно к этим углам, для которых было рассчитано значение облучённости, создаваемой солнечным светом. При оценке риска принималась во внимание температу-

Таблица 1

Критичные углы

Деталь	Критичные углы, град.	
	Азимутальный	Наклона
Тубус	86	35
Чёрная прокладка	-14	15
Фиксирующая РЛВД маска	78	9
Крышка	3	69

## Результаты моделирования и измерений

Деталь	Критичные углы, град.		Результат моделирования, °С	Результат измерений, °С	Расхождение результатов, %
	Азимутальный	Наклона			
Тубус	86	35	200	194	3,00
Чёрная прокладка	-14	15	190	188	1,05
Фиксирующая РЛВД маска	78	9	178	184	3,37
Крышка	3	69	129	131	1,55



Рис. 8. Результаты термического анализа тубуса

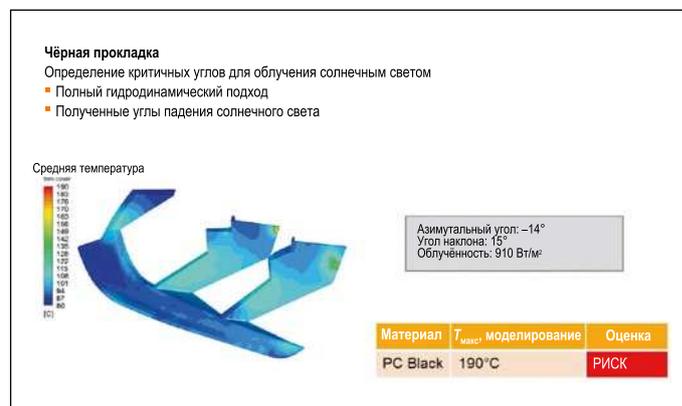


Рис. 10. Результаты термического анализа чёрной прокладки



Рис. 9. Результаты термического анализа фиксирующей РЛВД маски

ра размягчения по Вика различных видов поликарбоната [6]. Согласно результатам расчётов, максимальная температура на тубусе оказалась равной 200 °С.

В случае фиксирующей РЛВД маски (рис. 9) оказалось, что критичное направление задаётся равным 78° азимутальным углом и равным 9° углом наклона. Максимальная температура на фиксирующей РЛВД маске оказалась равной 178 °С.

В случае чёрной прокладки (рис. 10) оказалось, что критичное направление задаётся равным -14° азимутальным углом и равным 15° углом наклона. Максимальная температура на чёрной прокладке оказалась равной 190 °С.

### 3.2. Оптический анализ

Для исследования приводящего к появлению горячих точек фокусирования солнечных лучей была использована

оптическая система, сформированная с учётом критичных углов, полученных в результате проведения термического анализа. Оптическая стадия исследований осуществлялась с использованием программного модуля, написанного компанией *Automotive Lighting Company*.

В оптической системе обязательно присутствуют линза модуля (*module lens*), периферические детали (фиксирующая РЛВД маска, тубус и т.д.), а также внешние линзы. Центральная точка формируется на линзе модуля, и она же используется в качестве начала координат. Оси этой системы координат должны совпадать с осями используемого источника света. В рамках этой системы координат линии формируются в соответствии с определёнными позже критичными углами, тогда как для будущей области прохождения солнечных лучей создаётся своя система координат. Эта новая система координат формируется с учётом источника света и сформированного ранее файла *solar.dis* (входящий в состав программного модуля файл светораспределения (*light distribution file*)). Оптическая сцена формировалась применительно к передней поверхности фары. Эту сцену отнесли к категории «измерительный экран» (*measure screen*). Свет используемого источника света, отражённый или преломлённый в фаре, попадает на эту сцену, в результате чего оказывается возможным имитировать освещение дороги [7]. Участки поверхностей, которые в рамках рассматриваемой оптической системы оказываются горячими точками, считаются заданными, и трассировка лучей проводится с использованием по меньшей мере 1 млн лучей. Для мест на измерительном экране, которые соответствуют горячим точкам, при помощи обратной трассировки лучей определяются поверхности, от которых поступают преломлённые линзами модуля солнечные лучи.

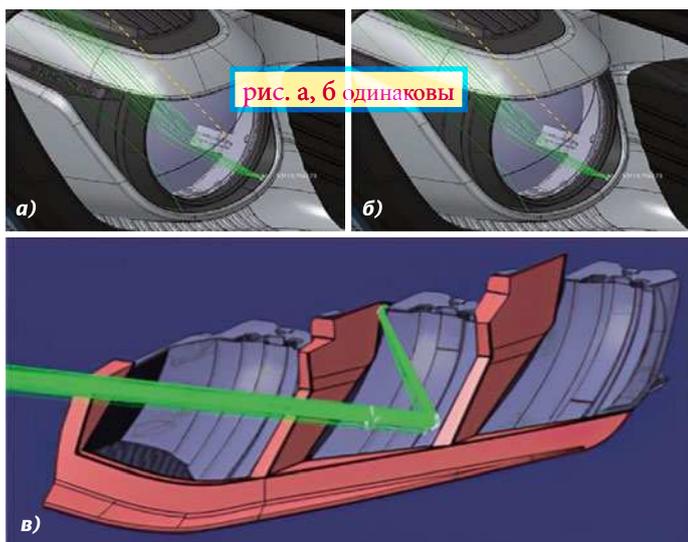


Рис. 11. Результаты расчётного определения горячих точек на тубусе (а), фиксирующей РЛВД маске (б) и чёрной прокладке (в)

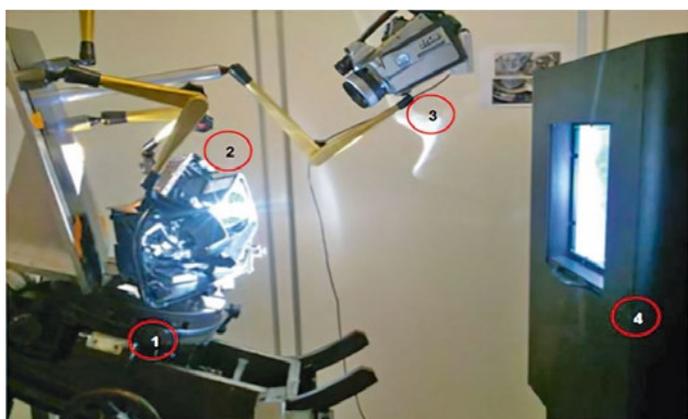


Рис. 12. Стенд для исследования фар: 1 – гониофотометр, 2 – фара, 3 – тепловизор, 4 – имитатор солнечного света

Результаты контрольных расчётов, проведённых применительно к оптической системе, сформированной с учётом углов, признанных рискованными на основе результатов термического анализа и рассмотрения фокусировки, приведены на рис. 11.

### 3.3. Результаты измерений

Результаты анализа были проверены в испытательной установке, сконструированной применительно к критичным углам. Фара помещалась в гониофотометр и подвергалась воздействию солнечного излучения. Температурные измерения всех деталей производились с использованием допускавшего перемещение по горизонтали и вертикали гониофотометра, который был настроен на критичные углы, полученные в результате проведённого термического анализа, и солнечного излучения, которое имитировалось испытательной установкой (рис. 12).

На рис 13 и 14 приведены, соответственно, результаты измерения температуры чёрной прокладки и фиксирующей РЛВД маски. Измерения производились при помощи тепловизора при температуре окружающей среды 23 °С. В результате было получено, что максимальные значения температуры на поверхностях чёрной прокладки и фикси-

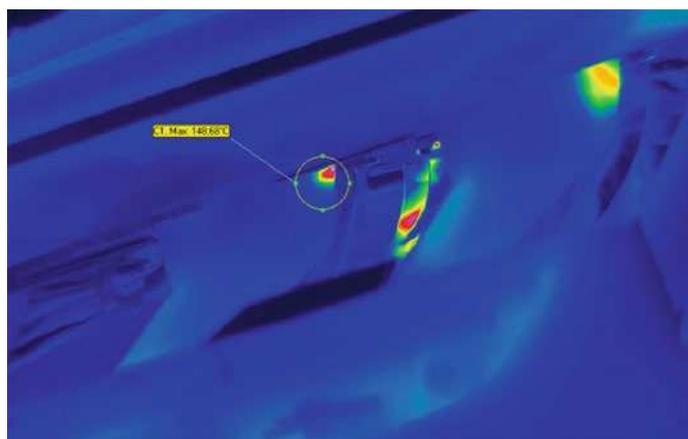


Рис. 13. Результаты тепловизионных измерений чёрной прокладки

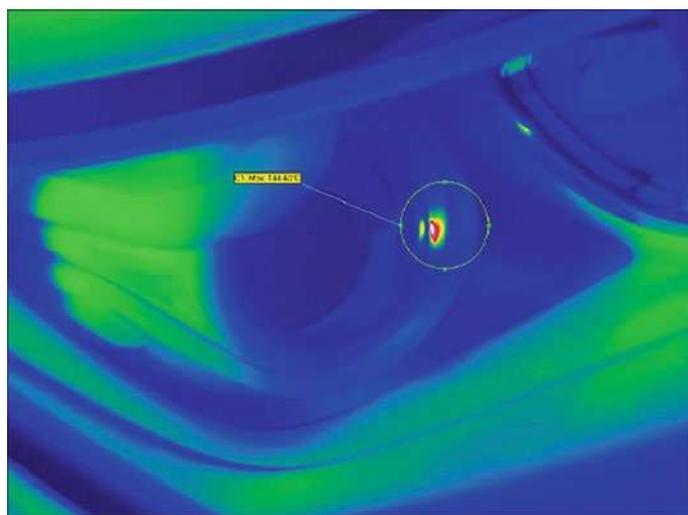


Рис. 14. Результаты тепловизионных измерений фиксирующей РЛВД маски

рующей РЛВД маски оказались равными, соответственно, 148,68 и 144, 40 °С.

### 4. Обсуждение

Так как измерения производились при комнатной температуре, то для обеспечения возможности сравнения с результатами расчётов в полученные результаты измерений были внесены поправки для приведения их к равной 80 °С температуре окружающей среды.

Результаты расчётов и измерений представлены в табл. 2. Было проведено сравнение результатов расчётов и результатов измерений, выполненных с использованием тепловизора, и определены расхождения между ними. Равное 3,37 % максимальное расхождение результатов имело место в случае фиксирующей РЛВД маски. Расхождение зависит от деформации пластмассовых деталей, их монтажа и производственных допусков и может быть как положительным, так и отрицательным. Исходя из значений температуры, полученных в результате анализа, можно предложить равное 10 °С минимальное с точки зрения безопасности допустимое отклонение от температуры размягчения пластмассовых деталей, предотвращающее возможность повреждения этих деталей по упомянутым причинам.

## 5. Заключение

Полученные расхождения между расчётными и экспериментальными данными не превышают 5 %, что говорит о совпадении результатов расчётов и измерений. Выбранные термопластичные материалы удалось предохранить от выцветания, деформации, выделения газов и подпалин при долгосрочном воздействии солнечного излучения, создаваемая которым облучённость соответствовала максимальному реальному уровню. В дальнейшем планируется проведение исследований с использованием материалов разного цвета, а также оптимизация входных параметров модели и сопоставление результатов расчётов с результатами измерений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The burning glass effect optical hot spot characterization for the automotive industry // Neonsee Application Note.– 2011. – No. 1.
2. Sivak, M., Schoettle, B., Flannagan, M.J. Mercury-free HID lamps: glare and colour rendering // Light. Res. Technol.– 2006. – Vol. 38, No. 1. – P. 33–40.
3. Jang, S., Shin, W.S. Thermal analysis of LED arrays for automotive head lamp with a novel cooling system // IEEE Trans. Dev. Mater Reliab.– 2008. – Vol. 8, No. 3. – P. 561–564.
4. Kasten, F., Young, A.T. Revised optical air mass tables and approximation formula // Applied Optics.– 1989. – Vol. 28. – P. 4735–4738.
5. Fischer, P. Radiative Heat Redistribution and Natural Convection Flow Inside an Automotive Fog Lamp // Proc. of the 6<sup>th</sup> Int. Symp. on Automotive Lighting, Darmstadt, Germany. 2001.
6. [https://www.plastics.covestro.com/~media/Product%20Center/PCS/Images/5\\_Library/Product%20brochures/Apec/Apec%20brochure.pdf?la=en&force=1](https://www.plastics.covestro.com/~media/Product%20Center/PCS/Images/5_Library/Product%20brochures/Apec/Apec%20brochure.pdf?la=en&force=1)

7. Blanckenhagen, B. v. Accurate Stray Light Simulations with the Bi- Directional Reflection Distribution Function // ISAL, 2005, P39.



**Эмре Ёзтюрк (Emre Öztürk), M. Sc. (2014 г.).**  
Место работы: компания Magneti Marelli Mako Elektrik Sanayi Ve Ticaret A.Ş., Бурса, Турция



**Мехмет Акмас (Mehmet Aktas), M. Sc. (2013 г.).** Аспирант Университета Улудаг (Ph.D.). Место работы: компания Magneti Marelli Mako Elektrik Sanayi Ve Ticaret A.Ş., Бурса, Турция



**Тунч Шеньюз (Tunç Şenyüz), Ph.D.** Место работы: компания Magneti Marelli Mako Elektrik Sanayi Ve Ticaret A.Ş., Бурса, Турция

## Сельское хозяйство и солнечные панели – win-win стратегия для энергетиков и фермеров

Массивы фотоэлементов обычно размещают в безлюдных местах, где нет ни полей, ни домов. Что касается полей – так делают потому, что, во-первых, солнечные панели требуют обслуживания, и никто не хочет, чтобы его посева вытаптывали. Во-вторых, панели отбрасывают тень, что негативно влияет на рост многих растений.



Но, как оказалось, второй фактор может стать преимуществом а не недостатком, в результате чего солнечные энергоустановки станут помогать выращивать тенелюбивые культуры. Таких немало, прямые солнечные лучи просто «сжигают» растения, любящие тень. Они либо погибают, либо не плодоносят. Оптимальные варианты комбинации солнечных панелей с сельским хозяйством сейчас ищут учёные из Аризонского университета.

Исследования проводятся на Юго-Западе США, где солнечно и сухо, так что тенелюбивые растения здесь не выращивают. И как раз в этом регионе солнечные панели могут оказаться очень полезными, поскольку они, затеняя большие площади поверхности, снижают уровень испарения влаги и защищают растения от прямых солнечных лучей. На данный момент уже готов испытательный комплекс. Здесь фотоэлементы размещены на высоте 3 м от поверхности земли – выше, чем это делается в обычной ситуации.

Для своего эксперимента учёные решили использовать три испытательных комплекса (а, скорее, грядки). Первый включает лишь растения, второй – панели, третий – и растения, и панели. Сельскохозяйственные культуры – перцы «халапеньо» и «чильтепин» и помидоры.

Результаты показали, что испарение влаги действительно замедляется в зоне, где стоят панели (собственно, это очевидно, если есть тень, то, ко-

нечно, испарение идёт более медленными темпами). Температура почвы немного ниже общего уровня днём и выше – ночью.

Что касается сельхозкультур, то они и вовсе чувствуют себя хорошо. Так, «чильтепин» рос явно активнее под солнечными панелями. Активность развития растений определяли по концентрации  $CO_2$ . Растения, которые произрастали в тени, давали на треть больше этого газа, чем те, что были вынуждены расти под лучами солнца, а их урожай был втрое выше, чем у выставленных на солнце.

«Халапеньо» чувствовали себя примерно одинаково хорошо и на солнце и в тени. «Теневые» развивались на 11 % медленнее, чем их «солнечные» собратья, но зато они потребляли на 65 % меньше воды. Разницы в урожайности почти не было – всё в рамках статистической погрешности.

Ну а помидоры в тени развивались на 65 % активнее, чем на солнце, потребляли на 65 % меньше воды и дали двойной по сравнению с «солнечными» растениями урожай.

Что касается солнечных панелей, то, по расчётам учёных, небольшое снижение температуры конструкций, которые стояли на грядках с растениями, привело к росту генерации энергии примерно на 3 %. (В силу пониженной температуры почвы и воздуха над растениями немного снижалась и температура конструкций.)

По словам исследователей, комбинирование фотоэлементов и сельскохозяйственных насаждений даёт возможность сократить потребление воды растениями, увеличить урожайность определённых видов, начать выращивать тенелюбивые сорта в местах, где много солнца, а также, хоть и совсем чуть-чуть, но повысить объёмы выработки электричества панелями. Да и для работников на полях наличие тени – существенный плюс.

nanonewsnet.ru/news/  
09.09.2019