

И. В. СОБЯНИН, к. т. н. В. Е. ТРОФИМОВ

Украина, Одесский национальный политехнический университет
E-mail: vovic@ukr.net

СИНТЕЗ СТРУКТУРЫ РЕШАТЕЛЯ СИСТЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ OpenFOAM ДЛЯ АНАЛИЗА ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА СВЕТОДИОДНОГО СВЕТИЛЬНИКА

*Для анализа теплового режима светодиода и разработки конструкции теплоотвода теплонагруженного светодиодного светильника синтезирована структура решателя задачи, основанная на базовом решателе *laplacianFoam* и функциях библиотеки *swak4Foam* системы математического моделирования OpenFOAM. Проведено сравнение результатов моделирования теплового режима объекта исследования, полученных при использовании модифицированного решателя, решателя проприетарной CAD/CAE-системы SolidWorks и аналитического решения. Приведен пример практического применения.*

Ключевые слова: светодиодный светильник (LED), тепловой режим, теплоотвод, CFD-моделирование, CAD/CAE-системы, OpenFOAM, laplacianFoam, swak4Foam.

В настоящее время в различных сферах человеческой деятельности все возрастающее применение находят светодиодные светильники [1]. Световая эффективность, цветовая гамма и срок службы их основных элементов — светодиодных излучателей или светодиодов — существенно зависят от тепловой мощности рассеяния и температуры, поэтому одним из обязательных этапов создания таких светильников является анализ их теплового режима, необходимого для разработки конструкции теплоотвода [2–5].

Анализ современных конструкций светодиодов, начиная от дискретных корпусных решений chip-scale packaging (CSP) на основе пластмассы plastic leaded chip carrier (PLCC) или керамики ceramic leaded chip carrier (CLCC) [5, 6] и заканчивая технологией сборки chip-on-board (COB) с непосредственным монтажом кристаллов на подложку [7, 8], а также особенностей применяемых систем теплоотвода [9–13] указывает на то, что для исследования теплового режима светодиодов адекватной тепловой моделью является гладкая или оребренная пластина с произвольно расположенным на ее поверхности источником тепла [14]. В области пластины, занятой источником, имеет место граничное условие (ГУ) 2-го рода. Тепловой поток посредством теплопроводности передается через зону контакта от источника тепла к пластине и так же распространяется по пластине, а затем с поверхности пластины, не занятой источником, рассеивается в окружающую среду путем конвекции и излучения при ГУ 3-го рода. Задача

анализа теплового режима сводится к определению температурного поля в трехмерном анизотропном многокомпонентном пространстве с источником тепла путем решения уравнения теплопроводности Фурье с указанными выше граничными условиями.

Получить распределение температуры в такой тепловой модели позволяет метод компьютерного моделирования, основанный на численном решении эллиптических дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов, который реализован практически во всех современных проприетарных CAD/CAE-системах [15–18]. Этот метод также реализован в свободных и открытых программных продуктах указанного типа, среди которых лидирующие позиции занимает система математического моделирования OpenFOAM [19]. Основным ограничительным фактором применения проприетарного программного обеспечения (ПО) является необходимость приобретения дорогостоящих лицензий для полнофункциональных версий [20], а свободное ПО уступает ему по функциональности и характеризуется крайне слабой официальной документированностью, особенно это касается задач анализа тепловых режимов и охлаждения электронных устройств [21]. Так, в системе математического моделирования OpenFOAM имеется два базовых решателя (функции в терминах языка C++), позволяющих получить распределение температурного поля в рассмотренной выше тепловой модели светодиодного излучателя. Это решатели

laplacianFoam [22] и *chtMultiRegionFoam* [23]. Первый из них прост и понятен в применении, но учитывает только ГУ 1-го рода в условиях отсутствия источников тепла. Второй позволяет учесть ГУ 2-го и 3-го рода, но для анизотропной многокомпонентной тепловой модели с источником тепла требует создания крайне сложной файловой системы задачи (case в терминах системы OpenFOAM). Известные применения этого решателя повторяют основные положения скудных официальных руководств и ориентированы на решение более простых задач для других объектов моделирования [24–26].

В этой связи представляет интерес расширение функциональных возможностей решателя *laplacianFoam* для учета наличия источника тепла при ГУ 2-го и 3-го рода, например, путем использования дополнительных функций библиотеки *swak4foam* [27] системы математического моделирования OpenFOAM. Свободное ПО позволяет выполнить такое расширение за счет изменения исходного программного кода базового решателя и файловой системы задачи и получить модифицированные решатель и файловую систему задачи с новыми свойствами.

Целью настоящей работы является синтез структуры решателя и разработка файловой системы задачи на основе базового решателя *laplacianFoam* и функций библиотеки *swak4foam* для анализа теплового режима светодиода и разработки конструкции теплоотвода теплонагруженного светодиодного светильника.

Синтез структуры модифицированного решателя и разработка файловой системы задачи

В основу работы базового решателя *laplacianFoam* положено решение следующего уравнения теплопроводности, справедливо для ГУ 1-го рода в условиях отсутствия источников тепла:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D_T \nabla^2 T, \quad (1)$$

где T – температура;

t – время;

D_T – температуропроводность;

∇^2 – оператор Лапласа.

Программный код решателя в синтаксисе OpenFOAM в таком случае выглядит следующим образом [22]:

$$\text{solve (fvM::ddt(T) - fvM::laplacian(DT,T)).} \quad (2)$$

Для возможности задания ГУ 3-го рода добавим в уравнение (1) температуру окружаю-

щей среды T_{inf} и температурный коэффициент теплопроводности b :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D_T (1 + b(T - T_{inf})) \nabla^2 T, \quad (3)$$

и тогда программный код решателя будет иметь вид

$$\text{solve (fvM::ddt(T) - fvM::laplacian(DT*(1 + b*(T - Tinf)),T)).} \quad (4)$$

Заголовочный файл интерфейса решателя *createFields.H* для представления температурного поля запишем следующим образом:

```
volScalarField T
(
    IOobject
    (
        "T",
        runTime.timeName(),
        mesh,
        IOobject::MUST_READ,
        IOobject::AUTO_WRITE
    ), mesh
);

volScalarField DT
(
    IOobject
    (
        "DT",
        runTime.timeName(),
        mesh,
        IOobject::MUST_READ,
        IOobject::AUTO_WRITE
    ), mesh
);

volScalarField b
(
    IOobject
    (
        "b",
        runTime.timeName(),
        mesh,
        IOobject::MUST_READ,
        IOobject::AUTO_WRITE
    ), mesh
);
```

Таким образом, данные о температурном поле T , температуропроводности DT и температурном коэффициенте теплопроводности b будут считываться решателем из последней текущей временной директории файловой системы задачи и сохраняться в ней же.

Температуру окружающей среды T_{inf} примем постоянной. Это значит, что ее значение будет считываться решателем из файла

transportProperties директории *constant* файловой системы задачи

```
dimensionedScalar Tinf
(
    transportProperties.lookup("Tinf")
);
```

Тогда, взяв за основу файловую систему задачи для базового решателя *laplacianFoam* [22], можно представить файловую систему задачи для модифицированного решателя. Как видно из рис. 1, она состоит из ряда директорий и файлов, содержащих необходимые для работы модифицированного решателя данные. Рассмотрим подробно те из них, в которых решается поставленная в настоящей работе задача.

В директории *0* находятся файлы с начальными значениями параметров *b* и *DT*. В отличие от базового решателя, здесь параметр *DT* может быть использован для анализа многокомпонентной тепловой модели, содержащей одновременно параметры нескольких материалов пластин. Файл *T* содержит начальные значения температуры в расчетной области тепловой модели.

В файле *initialConditions* поддиректории *include* директории *0* хранятся граничные условия задачи. Содержимое этого файла представляет собой несколько структур типа “имя переменной *тип_данных*” (в терминах языка C++) вида:

```
T_flow      double; // температура охлаждающей
              // среды, K
internalT    double; // начальная температура, K
internalDT   double; // температуропроводность
              // внутренних областей
              // расчетной области
              // тепловой модели, м²/с
Tinf         double; // температура окружающей
              // среды для решателя, K
DT_X         double; // температуропроводность
              // X-компонента внешних
              // областей расчетной области
              // тепловой модели, м²/с
b_X          double; // температурный
              // коэффициент
              // теплопроводности
              // X-компонента
              // внешних областей
              // расчетной области тепловой
              // модели, 1/K
lambda_X     double; // теплопроводность
              // X-компонента внешних
              // областей расчетной
              // области тепловой модели,
              // Вт/(м·K)
alpha        double; // коэффициент теплоотдачи,
              // Вт/(м²·K)
q            double; // плотность теплового
              // потока, Вт/м²
```

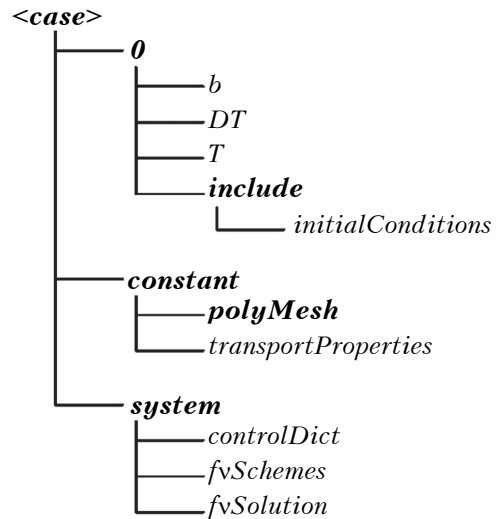


Рис. 1. Файловая система задачи для модифицированного решателя

В этом же файле для задания ГУ 2-го рода в области тепловой модели, занятой источником тепла, используется тип ГУ *groovyBC* из библиотеки *swak4foam* системы *OpenFOAM*, которое представим в структуре *boundaryField source_name* следующим образом:

```
boundaryField
{
    source_name
    value          uniform $internalT;
    type           groovyBC;
    variables      "lambda=$lambda_X*(1+
                  b*(T-$Tinf));";
    fractionExpression "0";
    gradientExpression "$q/lambda";
}
```

Здесь переменная *value* задает начальное распределение температуры, используя в качестве своего значения переменную *internalT* из файла *initialConditions*. Параметр *fractionExpression* отвечает за тип ГУ на выбранной поверхности тепловой модели. Для условий Дирихле, т. е. ГУ 1-го рода, его значение равно 1; для условий Неймана, т. е. ГУ 2-го рода, его значение равно 0. При этом плотность теплового потока *q* задается в соответствии с законом Фурье и является значением параметра *gradientExpression*. Здесь теплопроводность *lambda* принимает значение параметра *variables*.

Аналогичным образом представим ГУ 3-го рода на поверхностях тепловой модели, свободных от источника тепла. Для этого воспользуемся структурой *boundaryField face_name*:

```
boundaryField
{
  face_name
  value          uniform $internalT;
  type            groovyBC;
  variables       "lambda=$lambda_X*(1+
                  b*(T-$Tinf));";
  valueExpression "$T_flow";
  fractionExpression "1.0/(1.0+lambda/
                    (mag(delta())*$alpha));";
}
```

При этом коэффициент теплоотдачи α входит в выражение для значения параметра $fractionExpression$, которое получено из равенства теплового потока, поступающего к границе тепловой модели посредством теплопроводности, тепловому потоку, отводимому от границы путем конвекции и излучения в окружающую среду:

$$\alpha(T_{face} - T_{flow}) = -\lambda \frac{T_{centre} - T_{face}}{h}, \quad (5)$$

где T_{face} — температура поверхности;
 T_{centre} — температура центра граничного конечного элемента мешированной тепловой модели;
 h — расстояние между центром и поверхностью граничного конечного элемента.

Содержимое остальных директорий и файлов файловой системы задачи для модифицированного решателя (см. рис. 1) может быть перенесено из системы для базового решателя *laplacianFoam* без изменений, поскольку является инвариантным применительно к нашей задаче и его назначение хорошо документировано [22].

Оценка адекватности модифицированного решателя

Оценка адекватности модифицированного решателя проводилась путем сравнения результатов моделирования температурного поля тепловой модели, полученных с использованием модифицированного решателя, решателя проприетарной CAD/CAE-системы SolidWorks [16], а также известного аналитического решения в двухмерной постановке [28]. Выбор последнего обусловлен возможностью минимизации необходимых вычислительных ресурсов и оперативностью получения результата, например, в системе математических вычислений SciLab.

В качестве тепловой модели выбрана гладкая прямоугольная пластина длиной $L_x = 100$ мм, шириной $L_y = 50$ мм и толщиной 1,5 мм, на одной стороне которой располагался квадратный в плане источник тепла с размерами $2\Delta\varepsilon = 2\Delta\eta = 13,5$ мм (рис. 2).

Координаты центра источника тепла $\varepsilon = 24$ мм, $\eta = 30$ мм. Коэффициент теплоотдачи на по-

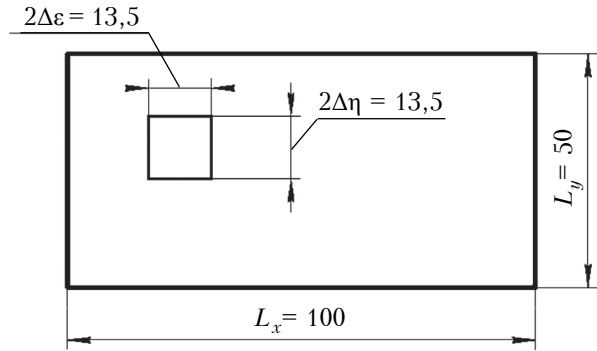


Рис. 2. Тепловая модель

верхностям пластины, свободных от источника, $\alpha = 10$ Вт/(м²·К), что соответствует естественному воздушному охлаждению гладкой плоской поверхности [28]. Теплопроводность материала пластины $\lambda = 193$ Вт/(м·К), что соответствует дюралюминию марки Д16. Мощность источника тепла 10 Вт. Температура охлаждающей среды $T_{inf} = T_{flow} = 295,65$ К.

В таблице приведены значения максимальной (T_{max}) и минимальной (T_{min}) температуры тепловой модели при $\alpha = 10$ Вт/(м²·К), а на рис. 3 — зависимости T_{max} от коэффициента теплоотдачи α , полученные различными способами для указанных исходных данных.

Как видно из рис. 3, при естественном воздушном охлаждении ($\alpha = 10$ Вт/(м²·К)) значения максимальной и минимальной температуры тепловой модели, определенные модифицированным решателем и решателем SolidWorks хорошо согласуются между собой — расхождение находится в пределах 1,9–2,5%. При этом аналитическое решение дает результат, сильно (в 1,25 раза) отличающийся в сторону больших значений. При значениях коэффициента теплоотдачи, меньших 10 Вт/(м²·К), что соответствует естественному воздушному охлаждению гладких плоских поверхностей в ограниченном пространстве [28], это отличие еще больше, а результаты компьютерного моделирования, полученные разными решателями, по-прежнему хорошо согласуются между собой. При значениях коэффициента теплоотдачи 25–50 Вт/(м²·К),

Значения максимальной и минимальной температуры тепловой модели, полученные различными способами при $\alpha = 10$ Вт/(м²·К)

Способ решения	T_{max} , К	T_{min} , К
Аналитическое решение, 2D-тепловая модель, SciLab	506,40	484,95
Модифицированный решатель	403,08	380,79
Решатель CAD/CAE-системы SolidWorks	410,84	390,12

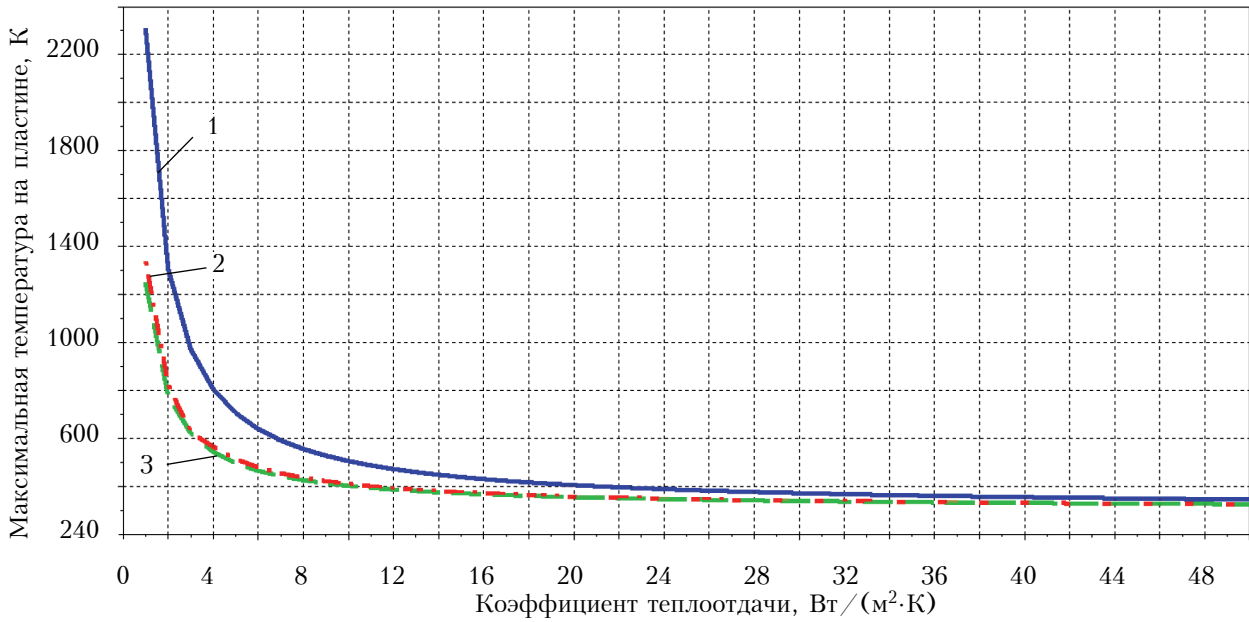


Рис. 3. Зависимость максимальной температуры тепловой модели от коэффициента теплоотдачи, полученные аналитически (1), решателем SolidWorks (2) и модифицированным решателем (3)

соответствующих принудительному воздушно-му охлаждению, все три варианта определения температуры в тепловой модели дают согласованный результат.

Таким образом, результаты, представленные в таблице и на рис. 3, свидетельствуют об адекватности и функциональности предложенного модифицированного решателя и указывают возможность его практического применения.

Пример практического применения модифицированного решателя

Модифицированный решатель был использован для исследования и анализа теплового режима светодиодного светильника, в котором в качестве излучателя использовался светодиод типа Samsung LC009D [29], установленный на металлический теплоотвод. Теплоотвод представлял собой прямоугольную пластину, одна из поверхностей которой имела оребрение в виде прямых ребер, как показано на рис. 4.

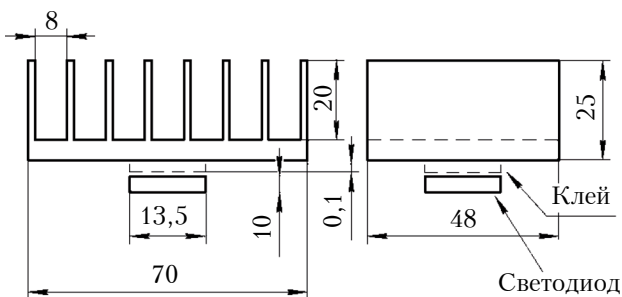


Рис. 4. Светодиод с теплоотводом

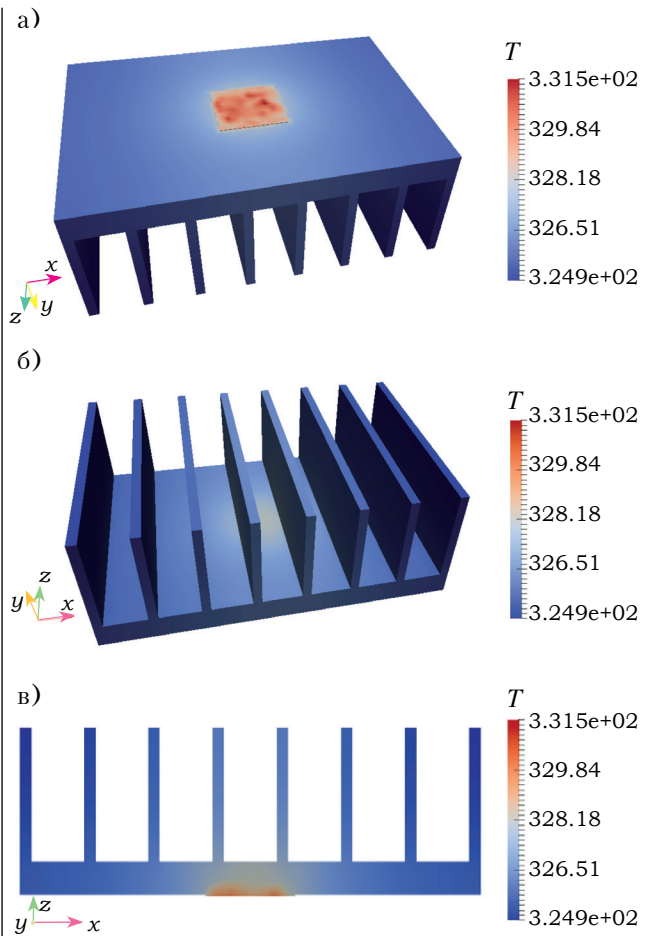


Рис. 5. Температурное поле светодиода и теплоотвода: а – вид со стороны светодиода; б – вид со стороны оребрения; в – поперечное сечение

Один из вариантов исходных данных для объекта исследования был следующим. Эквивалентный диаметр светодиода 13,5 мм, высота 10 мм. Мощность тепловыделения светодиода 10 Вт. Между светодиодом и теплоотводом нанесен слой клея марки Kaufer 5204 толщиной 0,1 мм теплопроводностью 1,5 Вт/(м·К). Габаритные размеры теплоотвода 70×48×25 мм. Материал теплоотвода дюралюминий марки Д16. Количество ребер 8. Расстояние между ребрами 8 мм. Охлаждение поверхностей теплоотвода происходит при коэффициенте теплоотдачи 10 Вт/(м²·К).

Результаты моделирования представлены на **рис. 5**. Визуализация распределения температуры получена путем экспортирования результатов решения задачи модифицированным решателем в визуализатор параллельных вычислений ParaView в соответствии с методикой, изложенной, например, в [21].

Таким образом, результаты моделирования показывают возможность эффективного использования синтезированного модифицированного решателя и разработанной файловой системы для решения практических задач.

Выводы

Как показали исследования, синтезированная в системе математического моделирования OpenFOAM структура решателя и разработанная файловая система задачи для решения уравнения теплопроводности Фурье в трехмерном анизотропном многокомпонентном пространстве с источником тепла при граничных условиях 2-го и 3-го рода позволяют получить практически такие же результаты, как и известный проприетарный решатель. На практическом примере показано, что синтезированный решатель и разработанная файловая система задачи могут быть с успехом использованы для решения такой важной задачи, как анализ теплового режима и разработка конструкции теплоотвода теплонагруженного светодиодного светильника.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Маркова С., Туркин А. Актуальные направления применения мощных светодиодов // Полупроводниковая светотехника. — 2016. — № 3. — С. 56–62. — <https://www.prosoft.ru/cms/f/468322.pdf>
2. Yurtseven M.B., Mete S., Onaygil S. The effects of temperature and driving current on the key parameters of commercially available, high-power, white LEDs // Lighting Res. Technol. — 2015. — Vol. 48, N 8. — P. 943–965. — <https://doi.org/10.1177/1477153515576785>
3. Schutt Ekaterina. Thermal management and design optimization for a high power LED work light. Degree Thesis. — ARCADIA. Plastics Technology 2014. — P. 1–72. — https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/80460/Schutt_Ekaterina.pdf

4. LED Thermal Management // LED professional Review. — 2009. — Iss. 13. — P. 1–64. — https://www.led-professional.com/downloads/LpR_13_468932.pdf

5. Thermal Management of Cree XLamp LEDs. Application Note. — Cree, Inc. — 2019. — 19 p. — <https://www.cree.com/led-components/media/documents/XLampThermalManagement.pdf>

6. Райт М. Светодиоды в CSP-корпусах для систем твердотельного освещения // CHIP NEWS Украина. — 2016. — № 6 (156). — С. 38–40. — [http://www.lightingmedia.ru/netcat_files/File/20\(2\).pdf](http://www.lightingmedia.ru/netcat_files/File/20(2).pdf)

7. Юсупов С. Оптика LEDIL для модулей с Flip-Chip светодиодами // Современная светотехника. — 2015. — № 6. — С. 24–25. — [http://www.lightingmedia.ru/netcat_files/File/24\(1\).pdf](http://www.lightingmedia.ru/netcat_files/File/24(1).pdf)

8. Ying S. P., Shen W. B. Thermal analysis of high-power multichip COB light-emitting diodes with different chip sizes // IEEE Trans. Electron Devices. — 2015. — Vol. 62, N 3. — P. 896–901. — <https://doi.org/10.1109/TED.2015.2390255>

9. Schneider M., Leyrer B., Herbold C., Maikowske S. High power density LED modules with silver sintering die attach on aluminum nitride substrates // 2014 IEEE 64th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). — 2014. — P. 203–208. — <https://doi.org/10.1109/ECTC.2014.6897289>

10. Wu Y., Tang Y., Li Z., Ding X., Yuan W., Zhao X., Yu B. Experimental investigation of a PCM-HP heat sink on its thermal performance and antithermal-shock capacity for high-power LEDs // Appl. Therm. Eng. — 2016. — Vol. 108. — P. 192–203. — <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.127>

11. Nikolaenko Yu.E., Kravets V.Yu., Naumova A.N. Baranyuk A.V. Development of the ways to increase the lighting energy efficiency of living space // International Journal of Energy for a Clean Environment. — 2017. — Vol. 18, iss. 3. — P. 275–285. — <https://doi.org/10.1615/InterJEnerCleanEnv.2018021641>

12. Nikolaenko Yu.E., Pekur D.V., Sorokin V.M. Light characteristics of high-power LED luminaire with a cooling system based on heat pipe // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. — 2019. — Vol. 22, No 3. — P. 366–371. — <https://doi.org/10.15407/spqeo22.03.366>

13. Лозовой М.А., Николаенко Ю.Е., Рассамкин Б.М., Хайрнатов С.М. Исследование рабочих характеристик тепловых труб для светодиодных осветительных приборов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2014. — №5–6. — С. 32–38. — <https://doi.org/10.15222/ТКЕА2014.2.32>

14. Собянин И.В. Решение задачи определения температурного поля пластины с источником тепла в системе математического моделирования OpenFOAM решателем laplacianfoam // 36. матеріалів 23-го Міжнар. молодіжного форуму «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті». Т.2 «Автоматизовані системи та комп'ютеризовані технології радіоелектронного приладобудування». — Харків: ХНУРЕ, 2019. — С. 5–6. — <https://nure.ua/wp-content/uploads/workshop/konferentsiia-avtomatyzovani-sistemy-ta-kompiuteryzovani-tekhnologii-radioelektronnoho-pryladobuduvannia-.pdf>

15. ANSYS Multiphysics. Thermal management [Electronic resource]. — <https://www.ansys.com/products/platform/multiphysics-simulation/thermal-management> (Date of the application 14.11.2019).

16. SOLIDWORKS Flow Simulation. Heat conduction in solids [Electronic resource]. — <https://www.solidworks.com>

com/product/solidworks-flow-simulation (Date of the application 14.11.2019).

17. ELMER. Application examples [Electronic resource]. – <https://www.csc.fi/web/elmer/application-examples> (Date of the application 14.11.2019).

18. COMSOL Heat Transfer Module [Electronic resource]. – <https://www.comsol.com/heat-transfer-module> (Date of the application 14.11.2019).

19. OpenFOAM. The open source CFD toolbox [Electronic resource]. – <http://www.openfoam.com> (Date of the application 14.11.2019).

20. Шеховцова В.І. Проблема вибору та критерії оцінки засобу автоматизованого проектування // Вісник НТУ “ХПІ”. – 2014. – № 26 (1069). – С. 101–108. – http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/9299/1/vestnik_HPI_2014_26_Shekhovtsova_Problema.pdf

21. Trofimov V. E., Pavlov A. L., Mamykin Y. G. CAD/CAE method of solving the hydrodynamic problem while developing powerful electronic devices // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2018. – № 2. – С. 33–41. – <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.2.33>

22. OpenFOAM. The open source CFD toolbox laplacianFoam [Electronic resource]. – <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-applications-solvers-basic-laplacianFoam.html> (Date of the application 14.11.2019).

23. OpenFOAM. The open source CFD toolbox chtMultiRegionFoam [Electronic resource]. – <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-applications-solvers-heat-transfer-chtMultiRegionFoam.html> (Date of the application 14.11.2019).

applications-solvers-heat-transfer-chtMultiRegionFoam.html (Date of the application 14.11.2019).

24. Лазарев Т.В. Моделирование теплоэлектричного стану за допомогою OpenFOAM // Вісник НТУУ “КПІ імені Ігоря Сікорського”. Серія: Хімічна інженерія, екологія та енергозбереження. – 2013. – № 1. – С. 26–30.

25. M. de Groot. Flow prediction in brain aneurysms using OpenFOAM. September 2, 2014 [Electronic resource]. – https://www.utwente.nl/en/eemcs/sacs/teaching/Thesis/masterthesis_meindert_de_groot.pdf (Date of the application 14.11.2019).

26. Juan Marcelo Gimenez, Axel Larreteguay, Santiago M'arquez Dami'an, Norberto Nigro. Short course on OpenFOAM development. ENIEF 2014. Instituto Balseiro - Bariloche, Argentina - September 2014 [Electronic resource]. – https://cimec.org.ar/foswiki/pub/Main/Cimec/CursoCFD/OF_Developers_Course.pdf (Date of the application 14.11.2019).

27. Bernhard F.W. Gschaider. README for swak4Foam [Electronic resource]. – https://openfoamwiki.net/images/e/e6/Swak4Foam_README.pdf (Date of the application 14.11.2019).

28. Дульнев Г.Н., Семьяшкин Э.М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. – Л.: Энергия, 1968.

29. High Voltage LED Series Chip on Board. LC009D-Gen.2. Product Family Data Sheet, Rev.1.8, 2017.08.14. <https://4donline.ihs.com/images/VipMasterIC/IC/SAMS/SAMS-S-A0003497324/SAMS-S-A0003497324-1.pdf>

*Дата поступления рукописи
в редакцию 25.10.2019 г.*

DOI: 10.15222/TKEA2019.5-6.25
УДК 536.24

І. В. СОБЯНІН, В. Є. ТРОФІМОВ

Україна, Одеський національний політехнічний університет
E-mail: vovic@ukr.net

СИНТЕЗ СТРУКТУРИ ВИРІШУВАЧА СИСТЕМИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ OpenFOAM ДЛЯ АНАЛІЗА ТЕПЛООВОГО РЕЖИМУ СВІТЛОДІОДНОГО СВІТИЛЬНИКА

Сьогодні в різних сферах людської діяльності все частіше застосовуються світлодіодні світильники, робота яких істотно залежить від теплової потужності розсіювання і температури. У зв'язку з цим, одним з обов'язкових етапів створення таких світильників є аналіз їхнього теплового режиму, необхідний для розробки конструкції тепловідводу.

В даній роботі для аналізу теплового режиму та розробки конструкції тепловідводу теплонавантажувачого світлодіодного освітлювача синтезовано структуру вирішувача задачі, яка основана на структурі базового вирішувача laplacianFoam та функціях бібліотеки swak4Foam системи математичного моделювання OpenFOAM. Проведено порівняння результатів моделювання теплового режиму теплової моделі світлодіоду у вигляді пластини з прямокутним джерелом тепла, отриманих з використанням модифікованого вирішувача, вирішувача пропрієтарної CAD/CAE-системи SolidWorks і аналітичного рішення. Проведено оцінку адекватності даних, отриманих із застосуванням модифікованого вирішувача, і доведено можливість його практичного застосування.

Проведено аналіз теплового режиму світлодіоду Samsung LC009D, встановленого на тепловідводі, який представляє собою прямокутну пластину, одна з поверхонь якої має на собі прямі ребра. Проведено дослідження можливості використання у подібній конструкції шару клею марки Kaufer 5204 товщиною 0,1 мм теплопровідністю 1,5 Вт/(м·К) в умовах природного повітряного охолодження поверхонь тепловідводів з коефіцієнтом тепловіддачі 10 Вт/(м²·К). Наведено температурні поля світлодіода та тепловідвода і показано можливість ефективного використання запропонованого підходу для вирішення практичних задач, які виникають під час розробки світлодіодних освітлювачів.

Ключові слова: світлодіодний світильник (LED), тепловий режим, тепловідвід, CFD-моделювання, CAD/CAE-системи, OpenFOAM, laplacianFoam, swak4Foam.

SYNTHESISING SOLVER STRUCTURE
OF THE OpenFOAM MATHEMATICAL MODELING SYSTEM
FOR ANALYSING THERMAL MODE OF LED LAMPS

Today LED lamps are used more and more widely in various fields of human activity. The operation of LEDs substantially depends on the thermal dissipation power and temperature. In this regard, one of the mandatory stages in the process of creating such lamps is the analysis of their thermal mode, which is necessary for the development of a heat sink.

In order to analyze the thermal mode and design the heat sink for powerful LED lamps, the authors synthesized the structure of the problem solver. The new structure was based on the structure of the basic laplacianFoam solver and the application of the swak4foam library functions, which is a part of the OpenFOAM computational fluid dynamics toolbox. The results of the thermal mode simulation of the LED thermal model (a plate with a rectangular heat source) obtained using a modified solver were compared with those obtained by the proprietary solver of the CAD/CAE SolidWorks system and those obtained by analytical computation. The data adequacy of the modified solver was estimated and its practical application verified.

The thermal mode of the Samsung LC009D LED, which is placed on the flat-plate finned heat sink, was analyzed. The Kaufer 5204 glue ability to be used in such design with natural convection cooling of the heat sink was tested. The glue thickness was 0.1 mm and its thermal conductivity was 1,5 W/(m·K). The heat sink's heat transfer coefficient was 10 W/(m²·K). The paper presents corresponding temperature distributions and shows that the new technique can be used for solving problems that arise when designing LED lamps.

Keywords: LED lamp, thermal mode, heat sink, CFD simulation, CAD/CAE systems, OpenFOAM, laplacianFoam, swak4foam.

REFERENCES

1. Markova S., Turkin A. [Current applications of high-power LEDs]. *Solid-State Lighting Magazine*, 2016, no.3, pp. 56–62. <https://www.prosoft.ru/cms/f/468322.pdf> (Rus)
2. Yurtseven M.B., Mete S., Onaygil S. The effects of temperature and driving current on the key parameters of commercially available, high-power, white LEDs. *Lighting Res. Technol.*, 2015, vol. 48, no. 8, pp. 943–965. <https://doi.org/10.1177/1477153515576785>
3. Schutt Ekaterina. Thermal management and design optimization for a high power LED work light. *Degree Thesis. ARCAD, Plastics Technology*, 2014, pp. 1–72. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/80460/Schutt_Ekaterina.pdf
4. *LED Thermal Management. LED professional Review*. 2009, iss. 13, pp. 1–64. https://www.led-professional.com/downloads/LpR_13_468932.pdf
5. *Thermal Management of Cree XLamp LEDs. Application Note*. Cree, Inc., 2019, 19 p. <https://www.cree.com/led-components/media/documents/XLampThermalManagement.pdf>
6. Rait M. [LEDs in CSP packages for solid state lighting systems]. *CHIP NEWS Ukraine*, 2016, no. 6 (156), pp. 38–40. [http://www.lightingmedia.ru/netcat_files/File/20\(2\).pdf](http://www.lightingmedia.ru/netcat_files/File/20(2).pdf) (Rus)
7. Yusupov S. [LEDIL optics for modules with Flip-Chip LEDs]. *Sovremennaya Svetotekhnika*, 2015, no. 6, pp. 24–25. [http://www.lightingmedia.ru/netcat_files/File/24\(1\).pdf](http://www.lightingmedia.ru/netcat_files/File/24(1).pdf) (Rus)
8. Ying S. P., Shen W. B. Thermal analysis of high-power multichip COB light-emitting diodes with different chip sizes. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2015, vol. 62, no. 3, pp. 896–901. <https://doi.org/10.1109/TED.2015.2390255>
9. Schneider M., Leyrer B., Herbold C., Maikowske S. High power density LED modules with silver sintering die attach on aluminum nitride substrates. *2014 IEEE 64th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 2014, pp. 203–208. <https://doi.org/10.1109/ECTC.2014.6897289>
10. Wu Y., Tang Y., Li Z., Ding X., Yuan W., Zhao X., Yu B. Experimental investigation of a PCM-HP heat sink on its thermal performance and antithermal-shock capacity for high-power LEDs. *Appl. Therm. Eng.*, 2016, vol. 108, pp. 192–203. <https://doi.org/10.1016/j.appltherm.2016.07.127>
11. Nikolaenko Yu.E., Kravets V.Yu., Naumova A.N., Baranyuk A.V. Development of the ways to increase the lighting energy efficiency of living space. *International Journal of Energy for a Clean Environment*, 2017, vol.18, iss. 3, pp. 275–285. <https://doi.org/10.1615/InterJenerCleanEnv.2018021641>
12. Nikolaenko Yu.E., Pekur D.V., Sorokin V.M. Light characteristics of high-power LED luminaire with a cooling system based on heat pipe. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2019, vol. 22, no. 3, pp. 366–371. <https://doi.org/10.15407/spqeo22.03.366>

13. Lozovoi M. A., Nikolaenko Yu. E., Rassamakin B.M., Khairnasov C. M. [Research on thermal characteristics of heat pipes for LED lightning devices]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2014, no. 5–6, pp. 32–38. <https://doi.org/10.15222/TKEA2014.2.32> (Rus)
14. Sobyenin I.V. [Solving the problem of determining the temperature field of a plate with a heat source in the OpenFOAM mathematical modeling system with the laplacianFoam solver]. *23rd International Youth Forum "Radioelectronics and Youth in the XXI century". Vol. 2*. Kharkiv National University of Radio Electronics, 2019, pp. 5–6. <https://nure.ua/wp-content/uploads/workshop/konferentsiia-avtomatyzovani-systemy-ta-kompiuteryzovani-tekhnohii-radioelektronnoho-pryladobuduvannia-.pdf> (Rus)
15. ANSYS Multiphysics. *Thermal management* [Electronic resource]. <https://www.ansys.com/products/platform/multiphysics-simulation/thermal-management> (Date of the application 14.11.2019).
16. SOLIDWORKS Flow Simulation. *Heat conduction in solids* [Electronic resource]. <https://www.solidworks.com/product/solidworks-flow-simulation> (Date of the application 14.11.2019).
17. ELMER. *Application examples* [Electronic resource]. <https://www.csc.fi/web/elmer/application-examples> (Date of the application 14.11.2019).
18. COMSOL Heat Transfer Module [Electronic resource]. <https://www.comsol.com/heat-transfer-module> (Date of the application 14.11.2019).
19. OpenFOAM. *The open source CFD toolbox* [Electronic resource]. <http://www.openfoam.com> (Date of the application 14.11.2019).
20. Shekhovtsova V.I. [Selection problem and evaluation criteria for computer aided design] *Visnyk NTU "KHPI"*, 2014, no. 26 (1069), pp. 101–108. http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/9299/1/vestnik_HPI_2014_26_Shekhovtsova_Problema.pdf (Ukr)
21. Trofimov V. E., Pavlov A. L., Mamykin Y. G. CAD/CAE method of solving the hydrodynamic problem while developing powerful electronic devices. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2018, no. 2, pp. 33–41. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.2.33>
22. OpenFOAM. *The open source CFD toolbox laplacianFoam* [Electronic resource]. <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-applications-solvers-basic-laplacianFoam.html> (Date of the application 14.11.2019).
23. OpenFOAM. *The open source CFD toolbox chtMultiRegionFoam* [Electronic resource]. <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-applications-solvers-heat-transfer-chtMultiRegionFoam.html> (Date of the application 14.11.2019).
24. Lazarev T.V. [Thermoelectric state simulation using OpenFOAM]. *Bulletin of NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Series "Chemical engineering, ecology and resource saving"*, 2013, no. 1, pp. 26–30. (Ukr)
25. M. de Groot. *Flow prediction in brain aneurysms using OpenFOAM*. September 2, 2014 [Electronic resource]. https://www.utwente.nl/en/eemcs/sacs/teaching/Thesis/masterthesis_meindert_de_groot.pdf (Date of the application 14.11.2019).
26. Juan Marcelo Gimenez, Axel Larreteguy, Santiago M'arquez Dami'an, Norberto Nigro. *Short course on OpenFOAM development. ENIEF 2014*. Instituto Balseiro, Bariloche, Argentina, September 2014 [Electronic resource]. https://cimec.org.ar/foswiki/pub/Main/Cimec/CursoCFD/OF_Developers_Course.pdf (Date of the application 14.11.2019).
27. Bernhard F.W. Gschaider. *README for swak4Foam* [Electronic resource]. https://openfoamwiki.net/images/e/e6/Swak4Foam_README.pdf (Date of the application 14.11.2019).
28. Dulnev G.N., Semyashkin E.M. *Teploobmen v radioelektronnykh apparatakh* [Heat transfer in electronic devices]. Leningrad, Energiya 1968, 360 p. (Rus)
29. *High Voltage LED Series Chip on Board*. LC009D–Gen.2. Product Family Data Sheet Rev.1.8, 2017.08.14, 15 p. <https://4donline.ihp.com/images/VipMasterIC/IC/SAMS/SAMS-S-A0003497324/SAMS-S-A0003497324-1.pdf>

Описание статьи для цитирования:

Собянин И. В., Трофимов В. Е. Синтез структуры решателя системы математического моделирования OpenFOAM для анализа теплового режима светодиодного светильника. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2019, № 5-6, с. 25–33. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.5-6.25>

Cite the article as:

Sobianin I. V., Trofimov V. E. Synthesising solver structure of the OpenFOAM mathematical modeling system for analysing thermal mode of LED lamps. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2019, no. 5-6, pp. 25–33. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.5-6.25>