

УДК 535.311

А.О.Разумовская, К.С.Торицин, М.А.Гилёв

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ КОНВЕКТИВНЫХ ПОТОКОВ ТЕЛЕВИЗИОННЫМ МЕТОДОМ

Институт электронных и информационных систем НовГУ

Experimental researches of structure of the convective streams formed in water around of the standard resistor were executed by the television method with use of system "Luch-K". The model is presented and calculation of a temperature field had done by the method of final elements.

Введение

Проектирование современных радиоэлектронных средств, работающих в экстремальных условиях эксплуатации, предполагает использование различных систем охлаждения, в том числе и жидкостных [1-3]. При этом возможны как минимум два варианта отвода тепла: как за счет непосредственного контакта электрорадиоэлемента с жидким хладагентом, так и через стенку. Для построения таких систем определенный интерес представляют знания о структуре образующихся конвективных потоков и характере распределения в них температуры [4,5].

Известно, что лазерно-телевизионные системы (ЛТС) довольно часто используются в роли визуализаторов различных процессов и явлений, включая тепловые [6,7]. Они отличаются простотой, наглядностью и высокой чувствительностью. В то же время переход к количественным оценкам в ЛТС, как правило, связан с определенными трудностями аппаратного и программного плана [8,9].

Целью данной работы является исследование тепловой структуры конвективных потоков, образующихся в жидкости вокруг электрорадиоэлементов.

Методика исследований

Экспериментальные исследования процессов свободной конвекции (визуализация) осуществлялись с помощью портативной ЛТС «Луч-К» (рис.1), по-



Рис.1. Лазерно-телевизионная система «Луч-К». Внешний вид

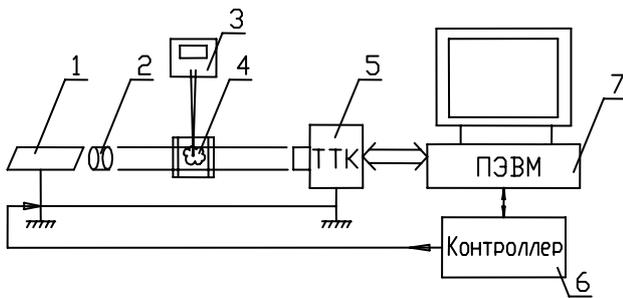
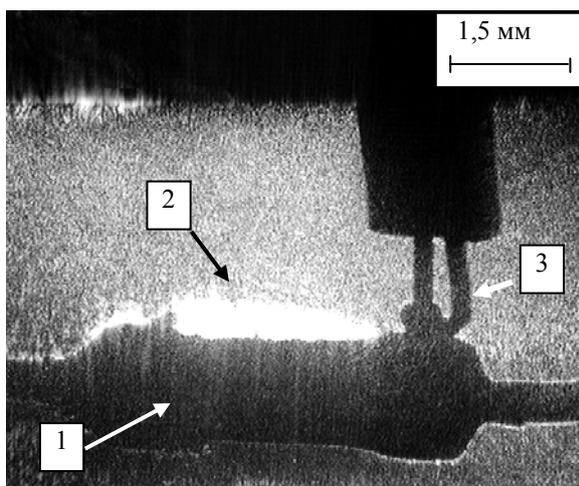


Рис.2. Структурная схема ЛТС «Луч-К»: 1 — источник света (лазер); 2 — коллиматор; 3 — тестер с термопарой; 4 — оптическая ячейка; 5 — теневая телевизионная камера на основе ФПЗС-матрицы; 6 — контроллер; 7 — ПЭВМ, программное обеспечение

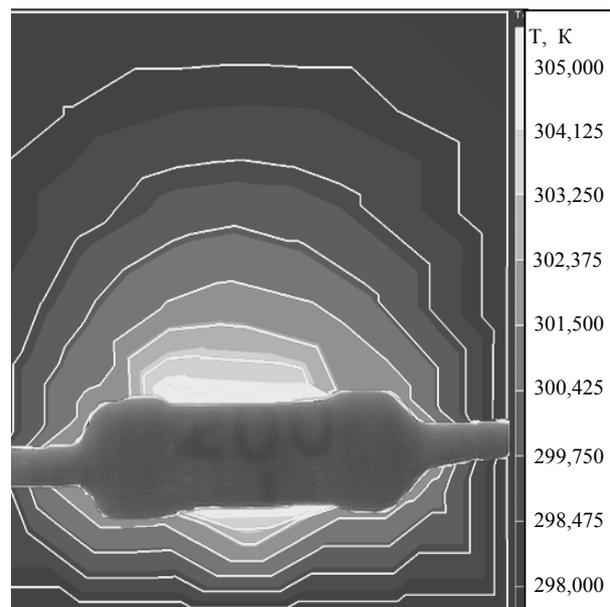
строенной по методу Теплера [10]. В оптический канал ЛТС помещалась специальная ячейка с прозрачными стенками, заполненная дистиллированной водой. В нее на держателе опускался исследуемый резистор МЛТ-0,125[Вт]-200[Ом], который через внешние выводы подключался к источнику электропитания. Для измерения температуры в различных точках ячейки использовалась стандартная термопара (ТХА) и цифровой тестер. Работа ЛТС осуществлялась следующим образом (см. рис.2). Предварительно расфокусированный луч (1) от полупроводникового лазера KLM 650/3 ($\lambda = 0,65$ мкм) собирался в параллельный пучок с помощью оптической системы (2), проходил через оптическую ячейку с резистором (4), а затем попадал в объектив теневой телевизионной камеры (5). Сформированное камерой теневое изображение процесса конвекции вокруг исследуемого резистора визуализировалось на дисплее ПЭВМ (7) с помощью специального программного обеспечения TSS-32. Мгновенный режим съемки позволял исследовать динамично протекающие процессы свободной конвекции.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис.3а приведен пример теневого изображения процесса свободной конвекции у нагретого резистора. Достаточно хорошо видно, что ЛТС позволяет наблюдать типичную картину теплового пограничного слоя (ТПС), образующегося вокруг цилиндрической поверхности и действующего по принципу положительной шлирной линзы [11]. При этом значительные изменения показателя преломления воды в пределах ТПС порождают большие углы отклонения светового луча и как следствие интенсивный яркостный контраст, наблюдаемый на мониторе ПЭВМ. Анализ литературных источников показал, что научную и практическую значимость представляют сведения о характере и численных значениях температуры в пределах ТПС [10-12]. Они могут быть получены как на основе зондовых измерений, в том числе с использованием термопар, так и путем применения специальных методов обработки теневых изображений [8,10]. Главный недостаток зондовых методов хорошо известен — искажение исходного поля температур. Второй метод требует получение теневых изображений высокого качества, что в рамках ЛТС затруднительно из-за использования стандартных (дешевых) оптических элементов. Известно, что для процессов конвекции важное значение имеет режим движения рабочей жидкости, который определяет механизм переноса тепла [5,12]. Так, при ламинарном режиме перенос теплового потока в направлении нормали к стенке в основном осуществляется теплопроводностью. При турбулентном режиме такой способ переноса тепла сохраняется лишь в вязком подслое (в тонком слое у поверхности из-за наличия вязкого трения течение жидкости затормаживается и скорость падает до нуля), а внутри турбулентного ядра перенос осуществляется путем интенсивного перемешивания частиц жидкости. Таким образом, интенсивность теплоотдачи с поверхности исследуемого резистора в основном определяется



а



б

Рис.3. Теневое изображение свободной конвекции вокруг резистора (эксперимент) (а) и модель температурного поля (б), построенная программой ELCUT. 1 — резистор; 2 — тепловой пограничный слой; 3 — термопара

термическим сопротивлением пристенного подслоя, которое по сравнению с термическим сопротивлением ядра оказывается определяющим [5,12]. Следовательно, как для ламинарного, так и для турбулентного режима течения вблизи самой поверхности применим закон Фурье, а полученные теневые изображения можно использовать при построении тепловой модели, позволяющей решать задачу по расчету температурного поля в пограничном слое.

Была разработана математическая модель в рамках нелинейной стационарной задачи в плоскопараллельной постановке. Такой подход обусловлен следующими особенностями: 1) с помощью ЛТС регистрируется лишь проекция теневого яркостного контраста; 2) наблюдается зависимость численных значений коэффициента теплопроводности воды от ее температуры; 3) методика регистрации теневого яркостного контраста осуществляется в режиме «стоп-кадра» (мгновенная съемка).

Исходное уравнение теплопроводности [12]

$$\frac{d}{dx}\left(\lambda(T)\frac{dT}{dx}\right) + \frac{d}{dy}\left(\lambda(T)\frac{dT}{dy}\right) = -q(T),$$

где $\lambda(T)$ — коэффициент теплопроводности, зависящий от температуры; $q(T)$ — теплопроизводительность единицы объема источников тепловой энергии; T — текущая температура, с учетом сформулированных ограничений решалось численным методом (метод конечных элементов) на ПЭВМ в стандартной среде «ELCUT» [13,14]. При построении математической модели использовались граничные условия первого рода $T = T_n$ (T_n — температура в точке прилипания) и третьего рода $\lambda_n \frac{dT}{dn} = -\alpha_k(T - T_c) - \beta(T^4 - T_c^4)$ (здесь λ_n — коэффициент теплопроводности в точке прилипания; $\frac{dT}{dn}$ — модуль градиента температуры; α_k — коэффициент теплоотдачи конвекции; T_c — температура среды; β — величина, равная произведению постоянной Стефана—Больцмана ($\sigma_0 = 5,7 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²·К⁴) на коэффициент излучательности поверхности материала зонда) [12], полученные из целенаправленных экспериментов.

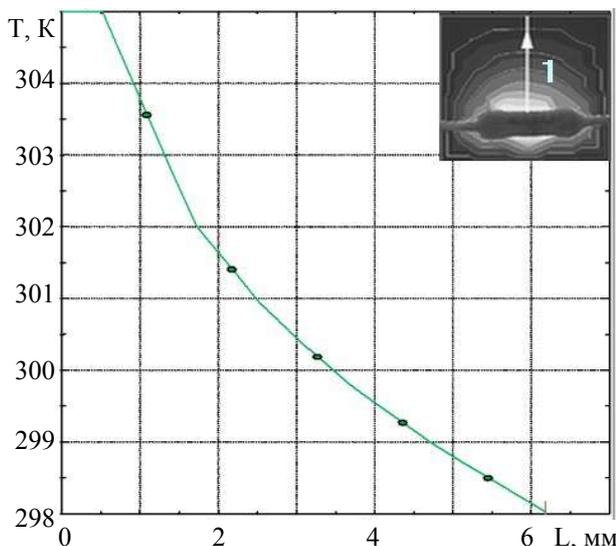


Рис.4. Распределение температуры воды в выделенном направлении от поверхности резистора (расчет)

Была выполнена серия расчетов, позволивших получить распределение температуры, градиентов и тепловых потоков. Из рис.3б видно, что температурное поле конвективных потоков вокруг резистора неравномерно, изотермы и тонированные области повторяют теневой контраст на рис.3а. Кроме того, моделирование позволило зафиксировать область с повышенной температурой под нижней поверхностью резистора, которая не видна на рис.3а, поскольку оптический нож в процессе эксперимента располагался сверху.

Количественные оценки изменения температуры в ТПС по выделенным направлениям от поверхности резистора (рис.4) показали, что наблюдается хорошая корреляция с яркостным контрастом (рис.3). А сравнение расчетных значений температуры с экспериментальными в реперных точках (внешний контур ТПС) позволило оценить величину относительной погрешности, которая составила не более 5%.

Выводы

1. Портативная лазерно-телевизионная система «Луч-К» позволяет визуализировать конвективные потоки в воде вокруг резистора с перепадом температуры 0,5°С.
2. Теневые изображения процессов свободной конвекции, полученные с помощью ЛТС «Луч-К», можно использовать для построения стационарной тепловой модели теплопередачи в пограничном слое.
3. Наблюдается хорошая корреляция между характером распределения температур, полученным расчетным (численным) методом, и яркостным теневым контрастом процесса конвекции вокруг резистора, зарегистрированного ЛТС.

1. Краус А.Д. Охлаждение электронного оборудования. Л.: Энергия, 1971. 247 с.
2. Лучинин В.В. // Тез. докл. II Междунар. семинара «Полупроводниковый карбид кремния и родственные материалы». В. Новгород: НовГУ, 1997. С.45-47.
3. Роткоп Л.Л., Спокойный Ю.Е. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры. М., 1976. 360 с.
4. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 712 с.
5. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергия, 1972. 342 с.
6. Карачинов В.А., Ильин С.В., Торицин С.Б., Карачинов Д.В. // Вестник НовГУ. Сер.: Техн. науки. 2004. №24. С.155-160.
7. Гиль В.В. Оптические методы исследования процессов горения. М.: Наука, 1984. 169 с.
8. Карачинов В.А., Ильин С.В., Торицин С.Б., Карачинов Д.В. Метод виртуальной сетки в задаче измерения температурного поля конвективных потоков // Тр. науч.-техн. конф. «Современное телевидение». М., 2004. С.52-53.
9. Бакулин В.Н., Рассоха А.А. Метод конечных элементов и голографическая интерферометрия. М.: Машиностроение, 1997. 312 с.

10. Васильев Л.А. Теневые методы. М., 1968. 240 с.
11. Хауф В., Григуль У. Оптические методы в теплопередаче. М.: Мир, 1973. 240 с.
12. Лыков А.В. Тепломассообмен. М.: Энергия, 1978. 480 с.
13. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.1. Руководство пользователя. ПК TOP. СПб., 1989-2003. 252 с.
14. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 318 с.