

Как уже было сказано, временной сигнал восстанавливался из спектров трех видов. Для сравнения результатов автоматического спектрального анализа была проведена процедура диагностирования сигнала с использованием модуля Vibroinf, получены наборы спектров к исходным (рис. 3).

Кроме сравнения окончательных заключений о допуске или недопуске подшипника к эксплуатации сравнивали подробные результаты спектрального анализа с указанием диагностических признаков отдельных дефектов (наличие характерных частот и их гармоник, процент глубины модуляции для характеристической частоты).

Проведенные исследования моделирования сигналов вибрации дефектных подшипниковых узлов показали, что процедуру восстановления временных сигналов из спектров трех видов можно использовать для формирования ВЭД подшипников (моделей тестовых временных сигналов). При помощи ВЭД можно проверять функциональные возможности ВДО в процессе выбора, также они могут служить в качестве тестовых сигналов для периодической проверки работоспособности подшипников при эксплуатации. В данном случае был рассмотрен пример использования ВЭД для подшипников качения, но такие виртуальные эталоны могут

быть созданы для любых других роторных механических узлов.

Л и т е р а т у р а

1. Тэттер В. Ю. Эталоны неисправностей для диагностики роторных механических узлов // Мир измерений. 2007. № 10. С. 14—19.
2. Кузнецов А. А. Дополнение теории спектрального анализа материалов элементами оценки физико-механических свойств и использования виртуальных эталонов: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. докт. техн. наук. Омск, 2007.
3. Ермишин С. М. Возможности создания виртуальных эталонов // Измерительная техника. 2002. № 10. С. 10—13; Ermishin S. M. Possibilities for creating virtual standards // Measurement Techniques. 2002. V. 45. N 10. P. 1007—1011.
4. Тэттер В. Ю., Молодова Е. В. Реализация вибрационных эталонов неисправностей подшипников колесно-моторных блоков локомотивов // Энергосберегающие технологии, контроль и управление для предприятий железнодорожного транспорта: Межвуз. тематич. сборник науч. трудов / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2011. С. 31—34.

Дата принятия 25.09.2012 г.

681.121:621.317:537.321

Магнитный расходомер жидких металлов

И. Д. ВЕЛЬТ, Ю. В. МИХАЙЛОВА

НИИТеплоприбор, Москва, Россия, e-mail: veltivand@gmail.com

Описан магнитный расходомер для жидкого натрия, индуктор которого представляет собой электромагнит, генерирующий импульсное низкочастотное магнитное поле. В результате полностью исключено воздействие внешних помех промышленной частоты, существенно снижено влияние ТЭДС, вихревых токов и т. д. Рассмотрены конструкция расходомера, его технические характеристики и методика поверки.

Ключевые слова: магнитный расходомер, жидкий натрий, импульсное низкочастотное магнитное поле.

The magnetic flowmeter for liquid sodium in which inductor represents an electromagnet creating a pulsed variable low-frequency magnetic field is described. As a result of the alternating magnetic field is completely excluded the influence of external noise power frequency, significantly reduced the influence of thermo-emf, virtually eliminated the influence of eddy currents, etc. The flowmeter design, its technical characteristics and checking technique are considered.

Key words: electromagnetic flowmeter, the liquid metal, pulsed magnetic field.

Жидкие металлы (натрий, калий и их эвтектики, литий, эвтектики свинца и висмута) используют в качестве теплоносителей в атомных энергетических установках. При этом возникает потребность в расходомерах для теплоносителей, способных работать в условиях, близких к экстремальным. Повышенная температура (400—525 °С), сложная радиационная обстановка, а также чрезвычайно высокие требования к надежности существенно ограничивают выбор методов измерений и конструкций приборов.

Наиболее распространенные расходомеры для жидкометаллических теплоносителей основаны на электромагнитном методе измерения. В них обеспечивается прямое преобразование расхода в электрический сигнал в соответствии с законом электромагнитной индукции Фарадея. Примени-

тельно к жидким металлам эти приборы принято называть магнитными расходомерами. Они отличаются от других средств измерений расхода жидких металлов прежде всего тем, что информативный сигнал определяется интегральным значением скорости потока по поперечному сечению трубопровода, т. е. расходом. В измерительном канале прибора отсутствуют какие-либо препятствия потоку, искажающие эпюру скоростей. Показания расходомеров мало зависят от изменения физических свойств измеряемой среды: плотности, вязкости, электрической проводимости и распределения скорости потока в канале.

Физические основы измерения расхода. Движение жидкого металла в магнитном поле вызывает появление в нем электрического поля, напряженность E которого равна век-

торному произведению скорости v потока на индукцию B магнитного поля:

$$E = [vB],$$

где E, v, B — векторы указанных величин.

Отсутствие электроизоляционной футеровки канала расходомера приводит к тому, что на его показания влияет шунтирующее действие стенки трубы. По ней протекают токи, вызывающие падение напряжения на внутреннем сопротивлении преобразователя расхода, которое оценивается коэффициентом

$$k_s = 2 \frac{D_1}{D_2} \left\{ 1 + \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 + \frac{\sigma_T}{\sigma} \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right] \right\}^{-1}, \quad (1)$$

где D_1, D_2 — внутренний и наружный диаметры трубы; σ, σ_T — проводимости жидкости и материала трубы; $k_s \leq 1$ тем ближе к единице, чем ближе D_1 к D_2 , т. е. чем тоньше стенка трубы и меньше отношение σ_T/σ .

Поскольку магнитное поле возбуждения неоднородно по длине трубопровода, в жидком металле возникают циркуляционные токи, замыкающиеся в краевых зонах, что вызывает механическое взаимодействие между жидкостью и индуктором. Сила этого взаимодействия пропорциональна скорости, проводимости жидкого металла и квадрату индукции магнитного поля возбуждения:

$$F \approx \sigma v B^2.$$

Таким образом, взаимодействие индукционных токов и магнитного поля возбуждения приводит к появлению силы торможения, препятствующей движению контролируемой среды. Эти токи обуславливают появление вторичного магнитного поля, которое, в свою очередь, искажает первоначальные магнитное поля возбуждения:

$$H_{BT} \approx j \approx \sigma [vB],$$

где H_{BT}, j — векторы напряженности вторичного магнитного поля и тока, индуцируемого в жидком металле, причем отношение напряженностей вторичного магнитного поля и поля возбуждения пропорционально проводимости и скорости жидкого металла.

Для качественной и количественной характеристик процессов, возникающих в расходомере, удобно пользоваться магнитогидродинамическими критериями подобия. Мерой гидродинамических эффектов является число Гартмана

$$Ha = (BD_1/2) \sqrt{\sigma/\eta},$$

где η — динамическая вязкость измеряемой среды.

Число Гартмана характеризует степень деформации электромагнитными силами профиля скорости течения. При небольших значениях Ha поправочный коэффициент k_m находится из выражения

$$k_m = \left(1 - \frac{Ha^2}{576} + \frac{471Ha^4}{921600} + \dots \right),$$

а при больших Ha он стремится к постоянному значению $k_m = 0,926$.

Магнитное число Рейнольдса Re_m , которое характеризует отношение напряженностей индуцированного (вторичного) магнитного поля и поля возбуждения, определяется как

$$Re_m = D_1 v \sigma \mu,$$

где μ — магнитная проницаемость измеряемой среды.

Так как вторичное магнитное поле вызвано краевым эффектом, влияние Re_m на сигнал расходомера при прочих равных условиях растет с уменьшением протяженности полюсов индуктора вдоль канала расходомера, иными словами, при приближении краевых эффектов к центральному поперечному сечению канала.

Характерные магнитогидродинамические параметры потока натрия при $T = 300^\circ C$; $\sigma = 6,0 \cdot 10^6$ (Ом·м)⁻¹; $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ и различных диаметрах трубы R_1 и расходах Q приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметр	Значение параметра при	
	$D_1 = 300$ мм, $Q = 1000$ м ³ /ч	$D_1 = 30$ мм, $Q = 10$ м ³ /ч
Средняя скорость v , м/с	3,9	3,9
Гидравлическое число Рейнольдса Re	$3 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^5$
Магнитное число Рейнольдса Re_m	8,92	0,892
Магнитная индукция B , Тл	0,01	0,1

Наблюдаемая при этом деформация магнитного поля ξ определяется прежде всего отношением протяженности l магнитного поля к диаметру трубы D_1 . При высокой степени однородности вдоль оси канала, т. е. при большом значении $\xi = l/D_1$, эффект изменения магнитного поля индуцированными токами отсутствует (за исключением составляющей магнитного поля вдоль оси канала, которая практически не влияет на сигнал расходомера). Индуцированные токи пропорциональны скорости и проводимости жидкости и зависят также от проводимости и толщины стенок трубы (см. (1)). Таким образом, эффект изменения магнитного поля определяется тремя безразмерными параметрами: $\xi, Re_m, w = \sigma_T(D_2 - D_1)/(\sigma D_1)$, так что степень деформации поля можно представить в виде $\Delta H = f(l/d, Re_m, w)$.

Изменение магнитного поля возникает только при $Re_m > 1,0$. Значение $Re_m = 1,0$ возможно лишь в трубах большого диаметра. При этом гидравлическое число Рейнольдса будет $Re \approx 10^5 \dots 10^6$, что соответствует развитому турбулентному течению. Такое течение характеризуется почти одинаковой скоростью всюду, кроме пограничного слоя, где происходит ее резкое уменьшение до нуля у стенки канала. Толщина

пограничного слоя $\delta \approx r/\sqrt{Re}$, при указанных значениях Re имеем $\delta/r \approx 0,3 \dots 0,1$ %. Поэтому при рассмотрении эффекта изменения магнитного поля индуцированными токами можно пренебречь пограничным слоем и принять скорость жидкости постоянной по всему каналу.

Традиционная конструкция магнитного расходомера. Такой расходомер для жидкого металла содержит трубу (ка-

нал) из нержавеющей стали, два измерительных электрода, приваренных к наружной поверхности стенки трубы, индуктор, создающий магнитное поле в рабочем объеме канала, и измерительное устройство. В жидких металлах, обладающих электронной проводимостью, явление поляризации электродов отсутствует, поэтому в магнитных расходомерах магнитное поле создают постоянным магнитом, который обеспечивает в канале магнитное поле, перпендикулярное плоскости, проходящей через линию, соединяющую электроды и ось трубы [1, 2].

Высокие температура и электрическая проводимость, а также отсутствие внутренней футеровки приводят к тому, что на показания расходомеров существенно влияет изменение температуры окружающей среды. В результате нагрева магнитной системы индукция магнитного поля и, следовательно, индуцируемая ЭДС уменьшаются. Соответствующий температурный коэффициент k_t можно выразить формулой

$$k_t = 1 - \beta_m (t_m - t_0),$$

где β_m — коэффициент размагничивания, $\beta_m = (2,6...2,8) \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$ [1]; t_m , t_0 — средняя и начальная температуры магнита, обычно $t_0 = 20^\circ \text{C}$.

Для уменьшения влияния температуры на чувствительность расходомера магнитную систему охлаждают, а в процессе изготовления подвергают термической обработке, чтобы стабилизировать магнитные свойства. Кроме того, расходомер с постоянными магнитами чувствителен к ТЭДС, возникающей в различных элементах конструкции прибора. Если материалы трубы и электродов различные и между электродами имеется разность температур, то возникает паразитная ТЭДС. Для сведения ее к приемлемому минимуму электроды и трубу изготавливают из одного материала, кроме того выбирают узлы трубы с теми парами электродов,

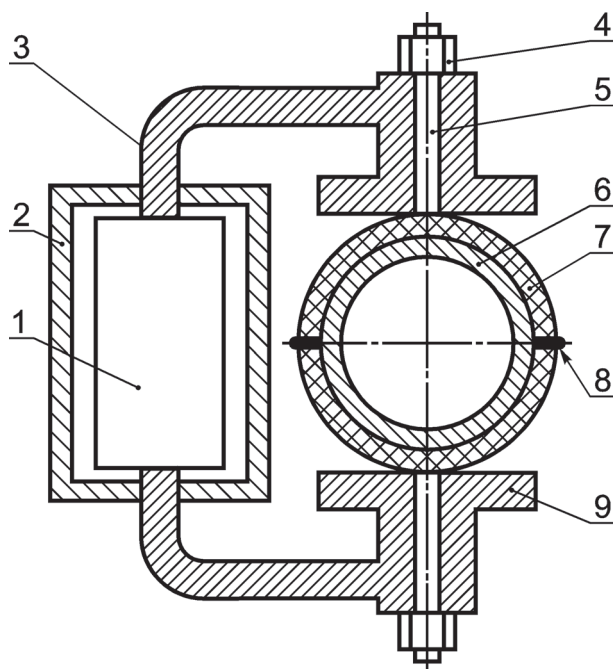
которые создают ТЭДС, не превышающую определенный максимум. Измерение проводят при такой индукции магнитного поля, при которой сигнал, возбуждаемый скоростью потока, существенно выше ТЭДС.

Магнитные расходомеры с постоянными магнитами благодаря простоте конструкции повсеместно распространены, но по указанным выше причинам они не удовлетворяют современным требованиям, предъявляемым к приборам в атомной промышленности, из-за низкой стабильности магнитного поля во времени; сильной зависимости метрологических характеристик от температуры; низкой помехозащищенности; отсутствию возможности контроля работы прибора при эксплуатации.

Новый тип магнитного расходомера. В НИИТеплоприбор разработаны магнитные расходомеры типа ИРМУ-1. В них вместо постоянных магнитов применен электромагнит, который питается импульсным низкочастотным биполярным стабильным током. На рисунке приведена схема конструкции прибора типа ИРМУ-1 для жидкого металла.

Магнитный расходомер состоит из трубы 6, выполненной из нержавеющей стали без электроизоляционного покрытия, и индуктора, содержащего магнитопровод С-образной формы 3 с полюсными наконечниками 9, и индукционную катушку 1. Для крепления индуктора к трубе у полюсов вдоль их оси имеются отверстия, оси которых совпадают с осями полюсных наконечников. Индуктор закреплен на трубе с помощью стоек 5, вставленных в отверстия полюсов. Стойки приварены к трубе 6 в местах пересечения образующей трубы с осью полюсов. С противоположной стороны стойки закреплены гайками 4. Крепежные элементы, соединяющие индуктор с трубой, расположены в тех местах поверхности центральной части трубы, в которых электрический потенциал индуцированного электрического поля всегда равен нулю: при этом не создается шунтирование сигнала расходомера, не нарушается распределение токов в стенках трубы. К внешней поверхности трубы перпендикулярно линии, соединяющей центры полюсов, приварены два электрода 8. Кожух 2 разделяет расходомер на две зоны — высокотемпературную, содержащую трубу с жидким металлом, и низкотемпературную, в которой располагаются индукционная катушка и центральная часть магнитопровода. Для снижения теплового воздействия на элементы конструкции прибора участок трубы, расположенный вблизи кожуха 2, обматывают теплостойкой изоляционной лентой 7 из базальтовой ткани. Благодаря такой конструкции обеспечивается повышенная надежность прибора и защита индукционной катушки от тепловой радиации трубы.

Сигнал между электродами измеряется только в те промежутки времени, когда индукция магнитного поля постоянна, причем его полярность периодически инвертируется. Период переходного процесса не является информативным и исключается из процесса измерения. Применение импульсного магнитного поля позволило отделить информативную составляющую сигнала от электромагнитных помех, изменение которых во времени некротно частоте изменения магнитного поля возбуждения. Таким образом, помехи, вызванные промышленной частотой и ТЭДС, полностью устранены. Вследствие этого существенно повысилась точность измерения расхода и появилась возможность на порядок снизить напряженность магнитного поля в канале прибора. Мощность индуктора не превышает 0,5 Вт.



Структурная схема расходомера:

1 — индукционная катушка; 2 — кожух; 3 — магнитопровод; 4 — гайка; 5 — стойка; 6 — труба; 7 — теплоизоляция; 8 — электрод; 9 — полюсный наконечник

Во время переключения полярности магнитного поля в различных элементах конструкции расходомера возникают токи Фуко. Благодаря алгоритму обработки сигнала и специальным прорезам в конструкции устранено их влияние на метрологические характеристики прибора в широком диапазоне изменения температуры жидкого металла. Отсутствует необходимость коррекции нуля, обеспечены измерения малых расходов и обратного потока, необходимые при эксплуатации расходомера на АЭС. Как известно, этими качествами не обладают расходомеры жидкого металла других типов, в частности, расходомеры с постоянными магнитами, вихревые и корреляционные.

Температура индукционной катушки зависит от изменения температуры измеряемой среды внутри трубы. Поэтому индукционную катушку изготавливают из медного провода с жаропрочной изоляцией типа ПОЖ, так как она может нагреваться до 200 °С и более. Нормированная температурная погрешность расходомера $\lambda = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, т. е. при изменении температуры жидкого натрия на 100 °С температурная погрешность прибора достигает 1,5 %. Это эквивалентно росту температуры индукционной катушки приблизительно на 50 °С и изменению ее сопротивления на 15—20 %.

Индукционную катушку дополнительно можно использовать в качестве термометра сопротивления для измерения температуры среды в канале расходомера и устранения температурной погрешности определения расхода. В этом случае расход вычисляют по формуле

$$Q = k \frac{U}{I} \left[1 - \frac{\lambda}{\rho_k} \left(\frac{U_k}{I} - R_k \right) \right],$$

где Q — расход измеряемой среды; k — градуировочный коэффициент; U — разность потенциалов между электродами; I — ток, протекающий через индукционную катушку; U_k — напряжение на клеммах индукционной катушки; R_k — электрическое сопротивление индукционной катушки при градуировочной температуре измеряемой среды; ρ_k — изменение электрического сопротивления индукционной катушки при изменении температуры измеряемой среды на 1 °С.

Кроме того, расходомер может служить для определения температуры измеряемой среды, которую находят по формуле

$$t = T_0 + (U_k / I - R_k) / \rho_k,$$

где T_0 — температура измеряемой среды, соответствующая условиям градуировки расходомера.

Применение индуктора переменного магнитного поля позволило решить вопросы диагностирования расходомера в процессе эксплуатации и контроля его метрологических характеристик. Поскольку при этом не происходит демонтажа расходомера и остановки потока жидкого металла, поверку выполняют поэтапно с применением имитационной установки Поток-Т [3]. В этом случае находят калибровочные факторы K_{F1} , K_{F2} , характеризующие коэффициенты преобразования первичного и электронного преобразователей, соответственно $K_{F1} = U/(IQ)$, $K_{F2} = Q_{эл}/(IQ)$, где $Q_{эл}$ — показания электронного преобразователя.

Калибровочные факторы предварительно измеряют непосредственно на проливном расходомерном стенде (после градуировки прибора), заносят в паспорт расходомера и

в электронную базу данных, а затем используют для сравнения с этими же параметрами, измеренными при поверке прибора в процессе его эксплуатации.

Поясним способы измерений калибровочных факторов с помощью установки Поток-Т. Для измерения K_{F1} на магнитопроводе расходомера имеется измерительная индукционная катушка, взаимоиנדуктивность M_k которой с индукторной катушкой в определенной мере характеризует взаимоиנדуктивность M индукторной катушки с потоком жидкого металла, протекающим по каналу расходомера, поскольку магнитный поток, пронизывающий измерительную катушку и канал расходомера, один и тот же. Калибровочный фактор K_{F1} можно выразить через взаимоиנדуктивность M в виде [3]:

$$K_{F1} = U/(IQ) = 4M/(\pi D_1^3).$$

Взаимоиנדуктивность M характеризует конструкцию индуктора, его расположение на трубе относительно электродов, напряженность и распределение магнитного поля в рабочей зоне канала. Иными словами, взаимоиנדуктивность между индуктором и потоком жидкого металла является определяющим параметром при конструировании расходомера, информативности сигнала об измеряемом расходе и чувствительности к условиям эксплуатации, $M \approx 10^{-6} \dots 10^{-7}$ Гн. При прочих равных условиях с увеличением диаметра канала пропорционально возрастает индуктивная связь индуктора с потоком жидкости.

Характеристики расходомеров ИРМУ-1. Измеряемая среда — жидкометаллический теплоноситель (натрий) с удельным электрическим сопротивлением не более $0,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Температура измеряемой среды 350—525 °С, давление не более 1,0 МПа. Температура воздуха, окружающего первичный преобразователь, 20—90 °С, относительная влажность 45—80 %. Температура воздуха в месте размещения электронного преобразователя 5—40 °С при относительной влажности до 80 %.

Разработано несколько модификаций расходомеров, отличающихся диаметром канала и диапазоном измеряемого расхода (табл. 2).

Таблица 2

Характеристики расходомеров

Модификация расходомеров	Номинальный диаметр канала, мм	Объемный расход, м³/ч	
		Q_{\min}	Q_{\max}
ИРМУ-1-25	25	0,03	3
ИРМУ-1-40	40	0,12	12
ИРМУ-1-80	80	1,3	130
ИРМУ-1-100	100	1,5	150

Пределы допускаемой основной погрешности измерений расхода не превышают ± 2 % верхнего предела измерений. Масса составных частей расходомера не более 11 кг для первичного и 8 кг для электронного преобразователей. Средний срок службы расходомера не менее 15 лет. Средняя наработка на отказ не менее 10^5 ч, соответствующая этой наработке вероятность безотказной работы расходомера за время 8000 ч — не менее 0,99 для первичного и 0,96 —

для электронного преобразователей. Расходомер имеет аналоговый выходной сигнал постоянного тока 4—20 мА и цифровую индикацию измеряемого расхода на индикаторном табло в диапазоне измерений 0—100 %.

Л и т е р а т у р а

1. **Кремлевский П. П.** Измерение расхода многофазных потоков. Л.: Машиностроение, 1982.

2. **Логинов Н. И.** Электромагнитные преобразователи расхода жидких металлов. М.: Энергоиздат, 1981.

3. **Вельт И. Д.** Особенности моделирования электромагнитных расходомеров жидких металлов // Измерительная техника. 2010. № 8. С. 39—44; **Velt I. D.** Features in the simulation of electromagnetic flowmeters of molten metals // Measurement Techniques. 2010. V. 51. N 8. P. 886—893.

Дата принятия 10.01.2013 г.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

681.7:539.216.22

Теплофизический анализ качества инфракрасных изображений удаленных слабоконтрастных объектов

Г. Н. ДУЛЬНЕВ *, **А. И. ПОХОДУН** **, **В. П. ХОДУНКОВ** **

* Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, С.-Петербург, Россия

** Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева, С.-Петербург, Россия, e-mail: walkerearth@mail.ru

Теоретически и экспериментально исследовано влияние процесса кондуктивного теплопереноса на качество тепловизионных изображений, получаемых при помощи микроболометрических матриц, а также влияние теплофизических свойств материала матрицы на функцию рассеяния линии. Определено оптимальное значение соотношения указанных свойств с размерами пиксельного элемента. Выполнен теплофизический анализ численных значений критериев обнаружения и идентификации. Показаны направления дальнейших исследований, даны практические рекомендации.

Ключевые слова: микроболометрическая матрица, функция рассеяния линии, тепловизор, качество изображения, критерии обнаружения.

Theoretically and experimentally investigated the influence of process heat transfer by conduction to the quality of thermal images obtained with the help of microbolometer matrices. The influence of the thermophysical properties of the matrix material on the function of the scattering lines defined by the optimal value of the ratio of these properties with the size of the pixel element. The analysis of the numerical values of the criteria for the detection and identification with the positions of the heat problem. Showing directions for further research, practical recommendations.

Key words: microbolometer matrix, scattering lines, thermal imager, the image quality, criteria for detection.

Широкое распространение средств тепловизионных измерений в различных отраслях науки и техники сделало актуальными задачи повышения качества получаемой информации о тепловых полях исследуемых объектов, разработку новых подходов к оценке критериев распознавания и идентификации, совершенствование методик выполнения измерений, обработки и анализа результатов. Ниже рассмотрены вопросы оптимизации качества тепловизионных изображений, получаемых при помощи микроболометрических матриц, а также новый подход к определению значений критериев распознавания и идентификации.

Качество тепловизионных изображений в системах тепловидения, как принято считать, характеризуется оптической передаточной функцией (ОПФ). Поскольку во многих системах тепловидения не всегда выполняются условия ее

существования во всех направлениях, часто требуется знать функцию рассеяния в направлении, где эти условия выполняются. Поэтому возникает необходимость в определении функции рассеяния линии (ФРЛ), представляющей реакцию на источник излучения в виде бесконечной тонкой линии, составленной из ряда дельта-функций [1]. Считается, что в системах тепловидения основной составляющей в ФРЛ обычно является конечный угловой размер приемника излучения. В оптических системах в общем случае существует семь основных видов аберраций, определяющих эту функцию: сферическая, комы, астигматизм, кривизна поля, дисторсия, хроматизм положения и хроматизм увеличения [2]. Аберрация обусловлена размером относительного отверстия оптической системы и углом наклона падающего пучка излучения к оптической оси. Также она зависит от условий, в кото-