

УДК  
621.1  
Ц-274

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

---

**МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)**

---

**Ф.Ф. ЦВЕТКОВ, А.В. КОСТАНОВСКИЙ, Е.В. ЕЖОВ**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВОГО КОЭФФИЦИЕНТА  
ИЗЛУЧЕНИЯ МЕТОДОМ СВЕТОВОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**Лабораторная работа №19**

**Методическое пособие**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

---

**МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)**

---

**Ф.Ф. ЦВЕТКОВ, А.В. КОСТАНОВСКИЙ, Е.В. ЕЖОВ**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВОГО КОЭФФИЦИЕНТА  
ИЗЛУЧЕНИЯ МЕТОДОМ СВЕТОВОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №19**

**Методическое пособие  
по курсам  
*Тепломассообмен*  
*Тепломассообмен в энергетическом оборудовании АЭС*  
*Теоретические основы теплотехники*  
для студентов, обучающихся по направлениям  
«Техническая физика», «Теплоэнергетика»,  
«Энергомашиностроение»**

УДК  
621.1  
Ц-274  
УДК: 621.1.016.44(076.5)

Утверждено учебным управлением МЭИ

Подготовлено на кафедре теоретических основ теплотехники  
им. проф. М.П. Вукаловича

Рецензент: доктор техн. наук, проф. Г.П. Плетнев

Цветков Ф.Ф., Костановский А.В., Ежов Е.В. Определение углового коэффициента излучения методом светового моделирования. Лабораторная работа №19. Методическое пособие. – М.: Издательство МЭИ, 2005. –12с.

Пособие содержит методику экспериментального определения угловых коэффициентов излучения на плоскость, расположенную за одним рядом труб, методом светового моделирования; расчет среднего коэффициента излучения плоскости на ряд труб; описание опытной установки; инструкцию по проведению экспериментов и компьютерной обработке опытных данных.

Лабораторная работа предназначена для студентов, обучающихся по направлениям «Техническая физика», «Теплоэнергетика», «Энергомашиностроение».

---

## 1. Методическое назначение работы

- Изучение метода экспериментального определения угловых коэффициентов излучения методом светового моделирования и получение навыков в проведении экспериментального исследования.
- Практика применения расчетного соотношения для среднего коэффициента излучения для системы черных поверхностей с однородными потоками излучения.
- Освоение методики компьютерной обработки экспериментальных данных.

## 2. Цель эксперимента

Целью работы является экспериментальное определение «локального» углового коэффициента излучения (с излучающей поверхности на поверхность светодиода) и вычисление средних коэффициентов излучения в замкнутой системе тел.

Для проведения инженерных расчетов потоков излучения требуются точные и надежные данные по угловым коэффициентам излучения в системах с черными и серыми поверхностями. Одним из способов определения угловых коэффициентов излучения является метод *светового моделирования*, который применяется в данной лабораторной работе.

## 3. Методика эксперимента и опытная установка

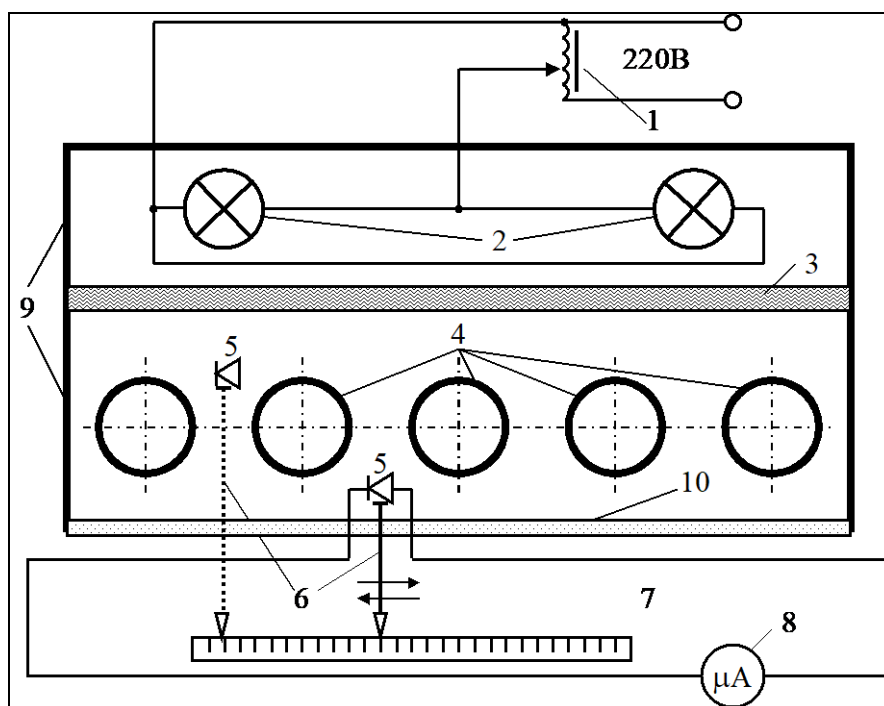


Рис. 1. Принципиальная схема опытной установки

Опытная установка представляет собой прямоугольную камеру 9, разделенную матовым светорассеивающим стеклом 3 на две части. Стекло марки МС-20 моделирует диффузно излучающую поверхность. В одной части камеры находятся электрические лампы 2, в другой - ряд параллельных труб 4, наружный диаметр которых  $d$ , а шаг между ними  $s$ . В лаборатории имеется два стенда с диаметрами труб 20 и 28 мм, шагом 45 мм (рис. 2). Поверхность труб покрыта материалом, полностью поглощающим световое излучение.

Питание электрических ламп 2 осуществляется от сети переменного тока через автотрансформатор 1. Для регистрации светового потока служит светодиод 5, соединенный с микроамперметром 8. Светодиод закреплен на конце стержня квадратного сечения 6. Стержень имеет возможность перемещаться по направлению к излучающей поверхности и от нее, а также в плоскости, находящейся за трубами. Координатное устройство 7 служит для определения положения светодиода 5.

Если зафиксировать какое-либо значение светового потока  $I_0$ , мА на поверхности «1'» (рис. 2), то на поверхности «3'» (за трубами) установится некоторое распределение прошедшего излучения  $I_{13}(x)$ , мА. Измеряя эти величины, мы можем определить величину «локального» углового коэффициента излучения  $\varphi_{1 \rightarrow dF}$ .

Для установления строгой количественной связи между измеряемыми величинами  $I_0$ ,  $I_{13}(x)$  и искомыми значениями угловых коэффициентов «локального»  $d\varphi_{1 \rightarrow dF}$  и среднего  $\bar{\varphi}_{13}$  необходима теория экспериментального метода.

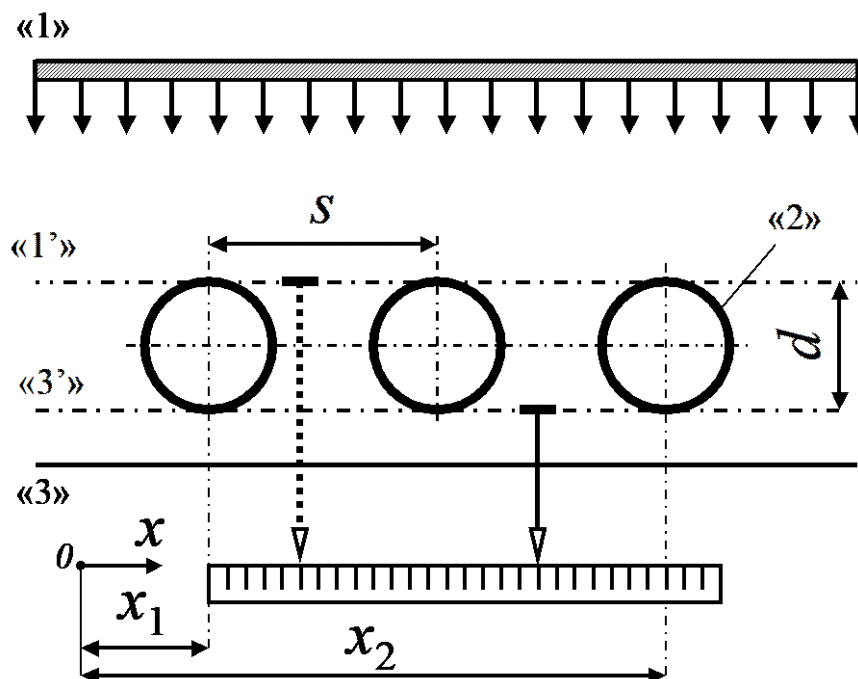


Рис. 2. Расчетная схема

Световое излучение поверхности «1» является диффузным (интенсивность исходящего от тела «1» излучения не зависит от направления), поэтому на установках лабораторной работы можно моделировать тепловое диффузное излучение с поверхности «1» на поверхности «3'» и «2». При этом, в расчетных соотношениях для угловых коэффициентов теплового излучения (см. ниже по тексту), тепловые потоки излучения заменяются световыми потоками.

Последнее обстоятельство лежит в основе *экспериментального метода светового моделирования*.

Согласно определению «локальный» и средний угловые коэффициенты излучения равны соответственно:

$$d\varphi_{1 \rightarrow dF} = \frac{dQ_{1 \rightarrow dF}}{Q_1}, \quad \bar{\varphi}_{13} = \frac{Q_{13}}{Q_1}. \quad (1)$$

Поток полусферического излучения  $Q_1$ , исходящий от плоской поверхности «1'» (рис. 2), и поток излучения  $Q_{13}$ , проходящий через плоскость 3' (за трубами «2»), выражаются через соответствующие плотности потоков излучения следующим образом:

$$Q_1 = \int_{F_1} E_1 \cdot dF_1, \quad Q_{13} = \int_{F_3} E_{1 \rightarrow dF} \cdot dF_3. \quad (2)$$

Здесь  $E_1$  – плотность потока излучения поверхности «1»,  $E_{1 \rightarrow dF}$  – плотность потока излучения попавшая с поверхности «1» на элемент  $dF$  поверхности «3'»;  $F_1, F_3$  – площади поверхностей «1'» и «3'» (рис. 2), через которые проходит излучение. Для экспериментальной установки (рис. 2)  $F_1 = F_3 = F$ . Для одномерного распределения потока излучения (вдоль оси  $x$ ), в расчете на 1м (перпендикулярно плоскости рисунка)  $F = 1 \cdot x$ . При этом, если поверхность ограничена координатами  $x_1 \leq x \leq x_2$ , то приходящийся на единицу длины трубы поток, Вт/м

$$dQ_{1 \rightarrow dF} = \int_{x_1}^{x_2} E_{1 \rightarrow dF} dx. \quad (3)$$

При постоянной плотности потока излучения плоскости «1» поток  $Q_1$  находится по формуле

$$Q_1 = E_1(x_2 - x_1). \quad (4)$$

Таким образом, «локальный» угловой коэффициент излучения  $d\varphi_{1 \rightarrow dF}$  равен

$$d\varphi_{1 \rightarrow dF} = \frac{dQ_{1 \rightarrow dF}}{Q_1} = \frac{\int_{x_1}^{x_2} E_{1 \rightarrow dF} \cdot dx}{E_1(x_2 - x_1)}, \quad (5)$$

а интегральный (средний) угловой коэффициент излучения  $\bar{\varphi}_{13}$  равен отношению

$$\bar{\varphi}_{13} = \frac{Q_{13}}{Q_1} = \frac{\int_{x_1}^{x_2} E_{13} \cdot dx}{E_1(x_2 - x_1)}. \quad (6)$$

Формула (6) справедлива для диффузного теплового излучения в замкнутой системе, когда поверхности «2» и «3» являются абсолютно «черными» с температурами, равными нулю градусов Кельвина (чтобы не было эффективного потока излучения с поверхности «2» на поверхность «3»), а ненулевая температура поверхности «1» не изменяется по поверхности. Только при таких условиях, тепловое излучение может быть смоделировано световым излучением. Этот метод, называемый методом *светового моделирования*, применяется в данной работе.

Формулы (5) и (6) лежат в основе экспериментального метода определения «локального» и среднего угловых коэффициентов излучения. При этом величины плотности тепловых потоков излучения заменяются плотностями световых потоков излучения, пропорциональных показаниям микроамперметра 8 (рис. 1).

Таким образом, при световом моделировании «локальный» угловой коэффициент излучения (5) вычисляется как:

$$d\varphi_{1 \rightarrow dF} = \frac{dQ_{1 \rightarrow dF}}{Q_1} \cong \frac{\bar{I}_{1 \rightarrow dF} dx}{\bar{I}_1(x_2 - x_1)}, \quad (7)$$

Здесь  $\bar{I}_{1 \rightarrow dF}$  - экспериментальные значения (показания микроамперметра 8 при положении светодиода в плоскости «3'»),  $\bar{I}_1$  - средняя величина тока при положении светодиода в плоскости «1'».

#### 4. Измерительная схема

Показания микроамперметра 8 (рис. 1) ( $I$ , мА) пропорциональны световому потоку  $Q$ . Светочувствительная часть светодиода имеет небольшие размеры, поэтому можно приближенно полагать, что фотодиодом измеряется локальная плотность светового потока  $dQ_{1 \rightarrow dF}$  (осредненная величина по поверхности светодиода).

#### 5. Проведение эксперимента

Включение установки производится в присутствии преподавателя. При нажатии кнопки «пуск», расположенной на приборной панели, загорается лампочка индикатора. Регулятором напряжения  $I$  (рис. 1) устанавливается

необходимое значение электрической мощности на лампах 2.

Следует запланировать измерения ориентировочно при 4-х различных режимах: четырех разных значениях электрической мощности (устанавливается регулятором  $I$ ). На данной установке максимально допустимое значение устанавливаемого тока  $\sim 100$  мА.

При проведении эксперимента необходимо:

- 1) установить с помощью регулятора напряжения  $I$  очередной режим, характеризуемый величиной тока  $I_0$ , мА (пропорционального световому потоку от поверхности «1»), в одной из точек на поверхности «1»;
- 2) измерить значение тока  $I_0$ , мА, контролируемого по показаниям микроамперметра 5 в трех точках  $x$ ;
- 3) измерить значение тока  $I_{13}(x)$ , мА (пропорционального прошедшему световому потоку от поверхности «1» к «3») контролируемого по показаниям микроамперметра 5 при перемещении светодиода вдоль поверхности «3» через 5 мм по шкале 7;
- 4) если необходимое число опытных точек получено, закончить эксперимент;
- 5) Перейти к пункту 1 и установить очередной режим.

Необходимо заготовить протокол измерений по следующей форме:

№ опыта	$I_0(x)$			$I_{13}(x)$										
1														
2														
3														
4														
$x_i$				0	5	10	15	...	125	130	135	140	145	150

Значения  $I_{13}(x)$  измеряются при позициях фотодиода 5 за трубами 4 (рис. 1, 2) при соответствующих  $x$ . Значения падающего светового потока  $I_0(x)$  измеряются при трех значениях  $x$  между трубами.

## 6. Первичная обработка данных

Для определения среднего углового коэффициента излучения используется формула (7), которая, с учетом пропорциональности показаний микроамперметра световому потоку, может быть записана в виде:

$$\bar{\varphi}_{13} = \int_{F_3} d\varphi_{1 \rightarrow dF} = \frac{\int_{F_3} dQ_{1 \rightarrow dF}}{Q_1} \cong \frac{\int_{F_3} \bar{I}_{13}(x) dx}{\bar{I}_0(x_2 - x_1)}, \quad (8)$$

где  $I_{13}(x)$  – сила тока, мА;  $x$  – координата перемещения фотодиода. Достаточно, чтобы интервал изменения  $x$  был кратен межтрубному шагу  $s$ , т.е. охватывал, например, расстояние между центрами 3-й и 5-й



трубы (если считать трубы слева направо).

Интеграл в числителе соотношения (8) (площадь под кривой в координатах  $I, x$ ) находится численно *методом трапеций*. Поверхность «3» равномерно разбивается на конечные отрезки  $\Delta x$  и соотношение (8) заменяется суммой  $n$  членов ряда

$$\bar{\varphi}_{13} \approx \frac{\sum_{i=1}^n \bar{I} \Delta x}{\bar{I}_0 (x_2 - x_1)}, \quad (9)$$

где значения  $\bar{I} \Delta x$  в этой сумме находятся по методу трапеций

$$\bar{I} \cdot \Delta x = \frac{I_i + I_{i+1}}{2} \cdot \Delta x. \quad (10)$$

Подставляя (10) в (9) получим окончательное соотношение для вычисления среднего углового коэффициента

$$\bar{\varphi}_{13} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{I_i + I_{i+1}}{2} \cdot \Delta x}{\bar{I}_0 \cdot (x_2 - x_1)}. \quad (11)$$

Обработку опытных данных и построение графиков  $\varphi_{13} = f(x)$  рекомендуется проводить в математическом пакете Mathcad.

### *Для каждого режима следует*

1. Вычислить среднеарифметическое значение тока фотодиода, определяемое по показаниям микроамперметра  $\delta$ , (мА)

$$\bar{I}_0 = \frac{I_0(x_1) + I_0(x_2) + I_0(x_3)}{3}, \quad (12)$$

где  $x$ , мм – координата светодиода при измерениях в плоскости «1'» (рис. 2).

2. Определить осредненное значение тока ( $\bar{I}$ , мА)

$$\bar{I} = \frac{\sum_{i=1}^n I_i + I_{i+1}}{2}; \quad (13)$$

$I_i$  – экспериментальные значения тока фотодиода, представленные в протоколе измерений, взятые для рекомендуемого диапазона  $x$ .

3. Определить средние угловые коэффициенты излучения  $\bar{\varphi}_{13}, \bar{\varphi}_{12}$ .

4. На заключительном этапе обработки экспериментальных данных следует: сопоставить  $\bar{\varphi}_{13}, \bar{\varphi}_{12}$  – непосредственно определенные величины средних угловых коэффициентов излучения (для всех опытов); сравнить их со значениями, полученными по аналитическим формулам (14); построить

графики изменения «локальных» угловых коэффициентов по поверхности «3»  $\varphi_{13} = f(x)$  в пакете Mathcad.

$$\bar{\varphi}_{13} = \frac{d}{s} \cdot \left[ \sqrt{\left(\frac{s}{d}\right)^2 - 1} - \arccos \frac{d}{s} \right] \text{ или } \bar{\varphi}_{13} = \sqrt{1 - \left(\frac{d}{s}\right)^2} - \frac{d}{s} \cdot \operatorname{arctg} \sqrt{\left(\frac{s}{d}\right)^2 - 1} \quad (14)$$

$$\bar{\varphi}_{12} = (1 - \bar{\varphi}_{13})$$

## 7. Отчет о работе

Отчет по выполненной работе должен содержать:

- формулировку цели эксперимента;
- принципиальную схему установки и краткое описание методики эксперимента;
- протокол наблюдений и обработки результатов опыта;
- таблицу результатов опыта и их графическое представление (график зависимости «локального» углового коэффициента излучения от  $x$ );
- сопоставление экспериментальных значений  $\bar{\varphi}_{13}, \bar{\varphi}_{12}$  со значениями, полученными по аналитическим зависимостям (14);
- краткую итоговую формулировку результатов эксперимента;
- выполнение общего и индивидуального варианта заданий.

Следует дать комментарии к полученным результатам для углового коэффициента излучения, обсудить возможные причины отклонения экспериментальных результатов от аналитических значений.

## 8. Варианты заданий

В лабораторной работе требуется:

1. При заданных значениях падающего с поверхности «1'» светового потока излучения  $I_0$  (число значений  $I_0$  задается по числу студентов в бригаде) экспериментально определить «локальные»  $d\varphi_{1 \rightarrow dF}$ , средний  $\bar{\varphi}_{13}$  угловые коэффициенты излучения плоскости «1'» на параллельную плоскость «3'» (рис. 1); определить средний угловой коэффициент  $\bar{\varphi}_{12}$  плоскости «1'» на ряд параллельных труб «2».

Каждый студент выполняет и обрабатывает одно из индивидуальных заданий экспериментального исследования, которое предусматривает получение средних значений угловых коэффициентов излучения  $\bar{\varphi}_{13}$  и  $\bar{\varphi}_{12}$  при фиксированном значении светового потока излучения  $I_0$ .

Таким образом, бригаде студентов следует выполнить несколько вариантов экспериментальных исследований (по величине падающего светового потока):

- *Вариант 1.*  $I_0=100$  мА;
- *Вариант 2.*  $I_0=80$  мА;
- и т.д. по числу студентов в бригаде.

2. Получить аналитическое соотношение для расчета среднего углового коэффициента излучения (используя метод натянутых нитей): плоскости «1'» на параллельную плоскость «3'» за рядом труб «2» (рис.2).

3. Сравнить экспериментально полученные значения угловых коэффициентов со значениями, полученными методом натянутых нитей.

4. Выполнить варианты индивидуальных *расчетных* заданий (см. ниже).

После выполнения заданий следует в отчете о работе обсудить причины возможного отклонения результатов, полученных в пункте 1 и пункте 2.

### ***Варианты индивидуальных расчетных заданий***

1. Принимая эффективную температуру факела в токе парового котла равной  $T_1=\text{const}$ , а его степень черноты (коэффициент теплового излучения) равной  $\varepsilon=1$ , найти приходящийся на единицу длины экранных труб падающий поток излучения и результирующий поток излучения от поверхности черных труб. Коэффициент пропускания топочных газов  $D_r=1$ . Наружный диаметр труб  $d=38$  мм, межтрубный шаг  $s=2d$ . Температура поверхности труб задается преподавателем для каждого студента индивидуально.

2. Для условий предыдущего задания найти температуру внутренней обмуровки топочной камеры, считая, что обмуровка представляет собой серое тело, а баланс теплоты для нее имеет вид  $Q_{\text{пол}} = Q_{\text{соб}}$ .

### **9. Вопросы для самостоятельной проработки**

1. Законы теплового излучения: Планка; смещения Вина; Стефана-Больцмана; Ламберта; Кирхгофа; Бугера.
2. Абсолютно черное тело. Серое тело.
3. Классификация различных потоков излучения.
4. Методы расчета теплообмена излучением между телами.
5. Угловые коэффициенты излучения и их свойства.
6. Методы определения угловых коэффициентов излучения.
7. Расчет угловых коэффициентов излучения методом «натянутых нитей».
8. Вывод формул для расчета средних угловых коэффициентов в системе четырех черных тел (рис.1) с использованием метода длин натянутых нитей.
9. Сущность метода светового моделирования и его физические предпосылки.
10. Устройство опытной установки, реализация предпосылок теории.
11. Обработка опытных данных.

## 10. Библиографический список

1. **Практикум по теплопередаче: Учеб. пособие для вузов/ А.П. Солодов, Ф.Ф. Цветков, А.В. Елисеев, В.А. Осипова; Под ред. А.П. Солодова. –М.: Энергоатомиздат. 1986.**
2. **Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Тепломассообмен. – М.: Издательство МЭИ, 2001.**
3. **Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. –М.: Энергоиздат, 1981.**

Учебное издание

Цветков Федор Федотович,  
Костановский Александр Викторович,  
Ежов Евгений Вячеславович

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВОГО КОЭФФИЦИЕНТА ИЗЛУЧЕНИЯ МЕТОДОМ СВЕТОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Лабораторная работа №19

Методическое пособие  
по курсам «Тепломассообмен», «Тепломассообмен в энергетическом  
оборудовании АЭС», «Теоретические основы теплотехники»  
для студентов, обучающихся по направлениям  
«Техническая физика», «Теплоэнергетика», «Энергомашиностроение»

Редактор издательства Е.Н.Касьянова

---

Темплан издания МЭИ 2003 г. (II). Подписано к печати 23.01.2005 г.  
Формат 60х84/16 Печать офсетная Физ.печ.л.0,75  
Тираж Изд. №23 Заказ \_\_\_\_\_

---

Издательство МЭИ, 111250, Москва, Красноказарменная, 14  
Типография ЦНИИ «Электроника», 117415, Москва, просп. Вернадского, д. 39