

ЗАКОНЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Закон прямолинейного распространения света

Свет в прозрачной, однородной среде распространяется по прямым линиям. Опытным доказательством этого закона могут служить наблюдения над резкими тенями, даваемыми точечными источниками света рис.1, или получение изображений при помощи малых отверстий. Но если мы будем

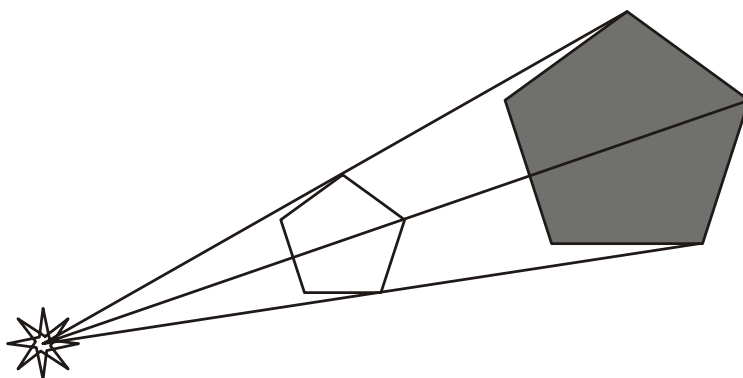


Рис. 1. Тень, создаваемая на пятиугольнике точечным источником света

уменьшать диаметр отверстия, то контрастность изображения будет ухудшаться. Возникает отступление от закона прямолинейного распространения света. Данные явления рассматриваются в учении о дифракции.

Закон независимости световых пучков

Действие световых пучков оказывается независимым, т.е. эффект, производимый отдельным пучком, не зависит от того, действуют ли одновременно другие пучки света или они отсутствуют. Это положение справедливо для традиционных источников света со слабой интенсивностью. Но световой пучок с сильным электромагнитным полем, например, лазерный луч, может изменить оптические свойства пространства (показатель преломления), что приведет к изменению хода второго луча. Для сравнения, напряженность электрического поля в солнечном свете на экваторе у поверхности Земли в ясный солнечный день порядка 10 В/см. Напряженность

электрического поля в лазерном световом пучке на несколько порядков выше. Так для некоторых рубиновых лазеров она составляет 10^4 В/см. Оптику слабых электромагнитных полей называют линейной оптикой, а оптику сильных полей – нелинейной оптикой.

Закон отражения света

Отраженный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и нормалью к поверхности, восстановленной из точки падения.

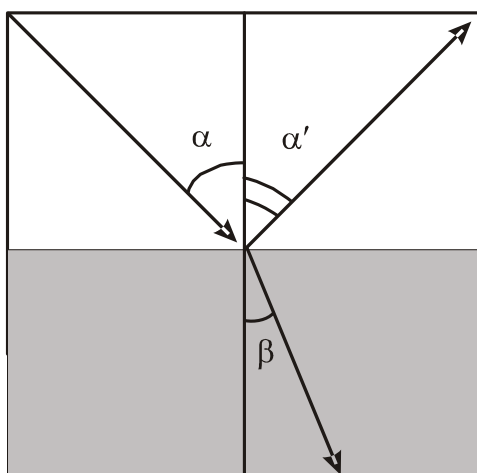


Рис. 2. Законы отражения и преломления света

Угол отражения равен углу падения $\alpha = \alpha'$.

Углы падения и отражения измеряются между направлением луча и нормалью к поверхности рис.2. Закон отражения света справедлив и для шероховатой поверхности. Параллельный пучок света отражается от нее диффузно, однако каждый луч подчиняется закону отражения.

Закон преломления света. Показатель преломления.

Преломленный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и нормалью к поверхности, восстановленной из точки падения рис 2.

Отношение синуса угла падения α к синусу угла преломления β есть величина постоянная для данной пары веществ:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{21} = \text{const} \quad (1)$$

Угол между нормалью и падающим лучом называется углом падения. Угол между нормалью и преломленным лучом называется углом преломления. Постоянная величина n_{21} называется относительным показателем преломления второй среды относительно первой. Показатель преломления среды относительно вакуума называется абсолютным показателем преломления. Как правило, эту величину называют просто показателем преломления.

Волновая теория устанавливает простую связь показателя преломления n_{21} со скоростью распространения световых волн в двух средах v_1 и v_2 :

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (2)$$

Абсолютный показатель преломления вещества n равен отношению скорости света в пустоте c к скорости света в веществе v :

$$n = \frac{c}{v}. \quad (3)$$

Относительный показатель преломления n_{12} выражается через абсолютные показатели n_1 и n_2 соотношением:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (4)$$

С учетом последнего выражения закон преломления света можно записать в симметричной форме:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta. \quad (5)$$

Из формулы (4) следует также:

$$n_{21} = \frac{1}{n_{12}}. \quad (6)$$

Таким образом, относительный показатель преломления первой среды по отношению ко второй и относительный показатель преломления второй среды по отношению к первой являются величинами взаимнообратными.

Показатель преломления воздуха $n = 1.00027$ отличается от показателя преломления вакуума всего на 0.03%. Поэтому при падении света из воздуха на некоторую среду в первом приближении можно пользоваться значениями абсолютного показателя преломления этой среды.

Показатель преломления вещества определяется его природой:

$$n = \sqrt{\varepsilon\mu}, \quad (7)$$

где ε и μ диэлектрическая и диамагнитная проницаемости вещества. Согласно электронной теории Лорентца (1896 год) диэлектрическая проницаемость зависит от частоты электромагнитного поля, а значит и от длины волны. Следовательно, показатель преломления зависит от длины волны: $n = f(\lambda)$. Это явление подтверждается экспериментальными фактами и называется дисперсией света. Кроме того, показатель преломления зависит от внешних условий, главным образом от температуры. В справочных таблицах физических величин обычно длину волны указывают подстрочным индексом, а температуру – надстрочным справа. Например, n_D^{20} означает показатель преломления при 20°C для D-линии натрия (589 нм).

Среда, показатель преломления в которой больше, называется оптически более плотной, в которой показатель преломления меньше – оптически менее плотной.

Полное внутреннее отражение света. Предельный угол.

При переходе из оптически более плотной среды в оптически менее плотную угол преломления β всегда больше угла падения α : преломленный луч удаляется от нормали (рис. 3, а). Очевидно в этом случае существует такой угол падения α_{np} , при котором угол преломления β равен 90°, т.е. преломленный луч становится скользящим по границе раздела сред (рис. 3, б). При угле падения

$\alpha > \alpha_{np}$ преломленного луча не существует: весь падающий свет целиком отражается, подчиняясь закону отражения света (рис. 3, б).

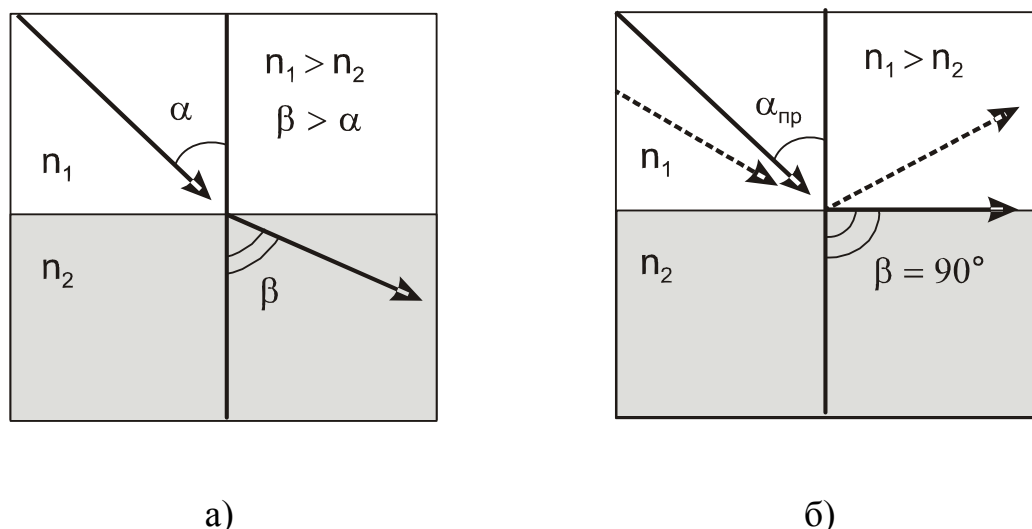


Рис. 3. Схематическое изображение хода лучей при прохождении луча из среды с большей оптической плотностью в менее плотную среду

Отражение света от поверхности раздела двух прозрачных сред, при котором преломленный луч полностью отсутствует, называется полным внутренним отражением света. Угол падения, начиная с которого преломленного луча не существует, называется предельным углом. Значение предельного угла определяется требованием, чтобы угол преломления равнялся 90° . Если α_{np} значение предельного угла падения, n_1 и n_2 абсолютные показатели преломления граничащих сред, то поскольку $n_1 \sin \alpha_{np} = n_2 \sin 90^\circ$, имеем:

$$\sin \alpha_{np} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{или} \quad \alpha_{np} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (8)$$

Так как $\sin \alpha_{np}$ не может быть больше единицы, то из формул (7) следует, что $n_1 > n_2$, т.е. полное внутреннее отражение света возможно лишь при прохождении света из вещества оптически более плотного в вещество оптически менее плотное.

ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

В общем смысле, дисперсией света называется разложение света в спектр, происходящее при преломлении, дифракции или интерференции. В более узком смысле, как уже указывалось выше, дисперсией света называют зависимость показателя преломления вещества от длины волны. Ход этой зависимости, наблюдаемый для всех прозрачных, бесцветных веществ в видимой области спектра, таков, что при увеличении длины волны показатель преломления уменьшается (нормальная дисперсия).

Для количественной характеристики зависимости показателя преломления данного вещества от длины волны вводится понятие дисперсии вещества. Дисперсией вещества называется величина $dn/d\lambda$, определяющая, как быстро меняется показатель преломления с изменением длины волны, либо $dn/d\omega$ - зависимость показателя преломления от частоты электромагнитной волны ($\lambda = \nu T = 2\pi\nu/\omega$, где ν – скорость света в веществе, T – период, ω - циклическая частота световой волны). Практически за меру дисперсии принимают либо среднюю дисперсию Δ , либо относительную дисперсию Ω :

$$\Delta = n_F - n_C, \quad \Omega = \frac{n_F - n_C}{n_D - 1}. \quad (9)$$

В практических каталогах обычно фигурирует величина, обратная относительной дисперсии, т.е.:

$$\nu = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C} \quad (10)$$

- так называемый коэффициент дисперсии или число Аббе. В этих уравнениях: n_F - показатель преломления среды для $\lambda = 486,1$ нм (синяя линия водорода, F); n_C - для $\lambda = 656,3$ нм (красная линия водорода, C); n_D - для $\lambda = 589,3$ нм (среднее из длин волн двух близких желтых линий натрия).

В результате дисперсии света происходит пространственное разделение пучков лучей различных длин волн. Для характеристики приборов, в которых

наблюдается дисперсия, вводят в качестве меры дисперсии специальную величину. Часто это угловая дисперсия:

$$D = \frac{d\varphi}{d\lambda}, \quad (11)$$

где $d\varphi$ - разность углов между пучками лучей, отличающихся по длине волны на $d\lambda$. Угловая дисперсия определяет угловое расстояние между пучками лучей, отличающихся на единицу длины волны.

РЕФРАКТОМЕТРИЯ

Показатель преломления является важной индивидуальной физической характеристикой вещества. Он принадлежит к числу немногих физических величин, которые можно измерить с очень высокой степенью точности, небольшой затратой времени и располагая при этом лишь малым количеством вещества. Оптические методы исследования вещества, основанные на измерении их показателей преломления, составляют самостоятельный раздел физической оптики – рефрактометрию. На основе рефрактометрических данных можно судить о составе вещества, молекулярной структуре, производить анализ сложных смесей веществ. Показатель преломления служит важным критерием чистоты вещества.

В основе рефрактометрического метода исследования лежит формула Лоренц-Лорентца, полученная при рассмотрении взаимодействия световой (электромагнитной) волны с молекулами вещества. Формула Лоренц-Лорентца связывает показатель преломления n изотропного вещества с числом молекул N в единице объема и поляризуемостью молекул α :

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{1}{3} N\alpha \quad (12)$$

И хотя вывод формулы Лоренц-Лорентца опирается на ряд не вполне оправданных допущений, так как она выведена для изотропного кубического кристалла, а результаты переносятся на газ и жидкость, кроме того

пренебрегается смещение ионов под действием электрического поля излучения и рассматривается только электронная поляризуемость, но на опыте это соотношение обычно хорошо выполняется и позволяет находить по измерениям показателя преломления рефракцию вещества R :

$$R = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \quad (13)$$

Опыт показывает, что рефракцию R смеси веществ можно вычислить, если известны рефракции R_1, R_2, R_3, \dots ее отдельных компонентов и их объемная доля (концентрация) $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots$ в смеси:

$$R = \delta_1 R_1 + \delta_2 R_2 + \dots + \delta_n R_n = \sum_n \delta_n R_n, \quad (14)$$

т.е. рефракция смеси является величиной аддитивной. Это возможно, если оптическое поведение молекул каждого компонента не зависит от присутствия других компонентов. В этом случае по показателю преломления вещества можно установить его концентрацию в растворе. Для смеси двух компонентов (раствора одной жидкости в другой), например: δ_1 – объемная доля первой жидкости, δ_2 – объемная доля второй жидкости, тогда

$$\delta_1 + \delta_2 = 1 \Rightarrow \delta_2 = 1 - \delta_1$$

При подстановке в уравнение (14) получаем:

$$R = R_1 \delta_1 + R_2 (1 - \delta_1).$$

Отсюда объемная доля (концентрация) растворенной жидкости:

$$\delta_1 = \frac{R_2 - R}{R_2 - R_1} = \frac{\frac{n_2^2 - 1}{n_2^2 + 2} - \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2}}{\frac{n_2^2 - 1}{n_2^2 + 2} - \frac{n_1^2 - 1}{n_1^2 + 2}}. \quad (15)$$

Лабораторная работа № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ С ПОМОЩЬЮ МИКРОСКОПА

Приборы и принадлежности:

Микроскоп, микрометр, пластинки из обычного стекла.

Описание метода

В основании метода лежит явление кажущегося уменьшения толщины прозрачной пластинки в следствии преломления световых лучей. Рассмотрим сечение вертикальной плоскостью тонкой плоскопараллельной пластинки (рис. 1), на нижней поверхности которой проведена узкая царапина А. Ее можно рассматривать как своеобразный источник света, дающий расходящийся световой пучок. Выделим два луча АС и АО этого светового потока. Луч АС падает на пластинку нормально к ее поверхности и поэтому проходит сквозь нее не преломляясь.

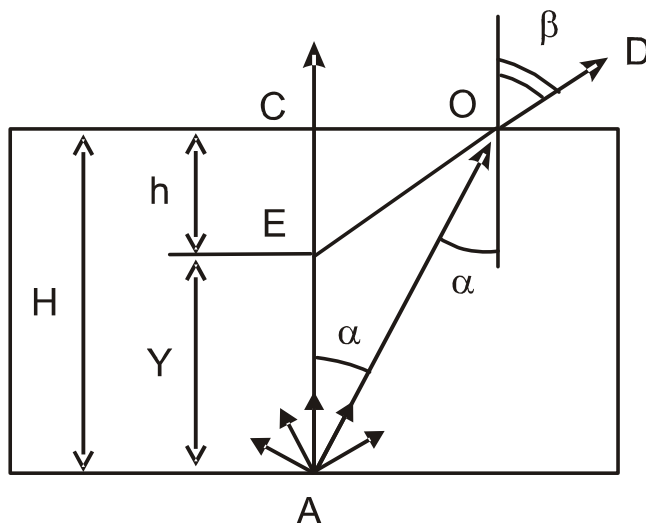


Рис. 1. Принципиальная схема эксперимента

Луч AO , проходящий в образце под углом α , попадает в точку "О" и при выходе из пластины образует угол β - больший, чем угол падения α . Если

смотреть из точки D по направлению DO, то наблюдатель будет видеть точку пересечения лучей OD и AC не в точке A, а в точке E, т.е. толщина пластики будет казаться равной CE. Из рис. 1 видно, что кажущаяся толщина пластинки $CE = h$ меньше ее действительной толщины $CA = H$.

Положение точки E (а следовательно, и расстояние CE) при данной толщине пластинки H зависит только от показателя преломления. Действительно, из рис. 1 следует, что:

$$\frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{H}{h} \quad (1)$$

(смотри треугольники $\triangle ECO$ и $\triangle ACO$). С другой стороны

$$\frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = n, \quad (2)$$

где n – показатель преломления пластинки. Для малых углов α и β (только такие лучи в нашем случае попадают в объектив микроскопа)

$$\frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha} \approx \frac{\sin \beta}{\sin \alpha}. \quad (3)$$

Сравнивая (1), (2) и (3), имеем

$$n = \frac{H}{h}. \quad (4)$$

Таким образом, если измерить истинную толщину пластинки H и ее кажущуюся толщину h, можно определить показатель преломления. Толщину пластинки H можно измерить обычным микрометром, а h – с помощью микроскопа, столик (или тубус) которого снабжен микрометрическим винтом. В настоящей работе непосредственно измеряется не h, а величина $AE = H-h$, т.е. расстояние, на которое якобы уменьшается толщина пластинки.

В этом случае микроскоп сначала фокусируют на вспомогательную прозрачную пластинку, на верхней поверхности которой проведены узкие царапины. Если теперь на вспомогательную пластинку положить испытуемый образец, фокусировка нарушится, поскольку в следствии преломления

светового потока штрих A (рис. 2) будет казаться смещенным в положение E , а фокусное расстояние объектива f не изменилось. Величина, на которую придется поднять тубус, чтобы вновь сфокусировать микроскоп, дает значение $AE = H - h = Y$. Показатель преломления можно вычислить так:

$$n = \frac{H}{H - Y} . \quad (5)$$

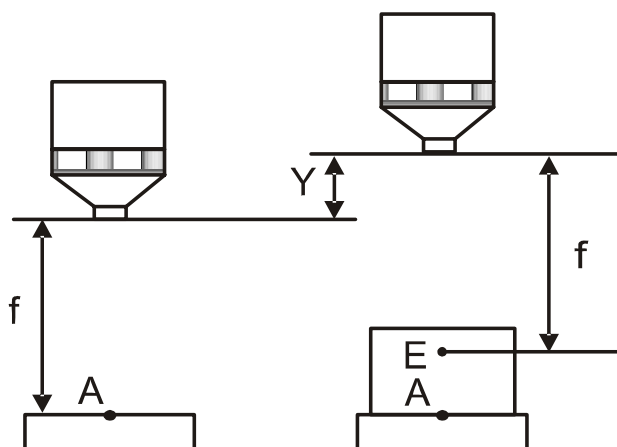


Рис. 2 Оптическая схема экспериментальной установки.

Описание установки

На рис. 3 показан общий вид микроскопа. Его оптическая схема состоит из двух систем: наблюдательной, в которую входит объектив 1 и окуляр 2, вмонтированный в тубус микроскопа 3, и осветительной, состоящей из осветительной лампы и поворотного зеркала. На металлическом устойчивом основании микроскопа 4 укреплен механизм микрометрической фокусировки 5 и тубусодержатель 6, имеющий форму дуги. Механизм фокусировки приводится в движение вращением рукоятки 7, причем повороты против часовой стрелки поднимают тубус, а, по часовой – опускают относительно предметного столика 8. Последний крепится к коробке механизма микрометрической фокусировки с помощью специального кронштейна.

На оси левой рукоятки механизма микрометрической фокусировки имеется барабан со шкалой, отчет по которой позволяет измерять перемещение

предметного столика (оно порядка 2.2 мм). Цифровые значения, нанесенные на барабане, соответствуют перемещению 0.01 мм. Цена одного деления 0.002 мм. Для удобства подсчета числа полных оборотов барабана микрометрический механизм микроскопа снабжен трещеткой.

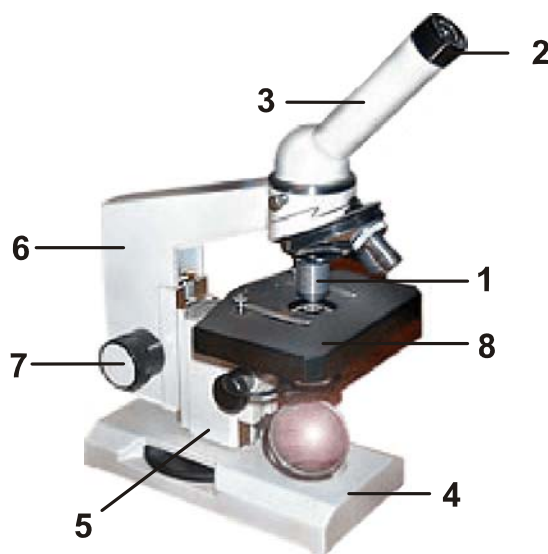


Рис. 3. Внешний вид микроскопа

Измерения и обработка результатов измерения

1. Измерить микрометром истинную толщину пластики *H*. Результат занести в соответствующую колонку таблицы.

2. Осторожно вращая рукоятку механизма микрометрической фокусировки (по часовой стрелке), поднять столик микроскопа в крайнее верхнее положение. Выбрать люфт микрометрического винта, для этого повернуть рукоятку микрометрической настройки на 1-2 оборота против часовой стрелки. На отчетном барабане установить значение "0".

3. Перемещая тубус микроскопа (рукоятка 7), добиться четкого изображения штрихов, нанесенных на вспомогательной пластине. При необходимости положение штрихов можно отцентрировать. Для этого вращают регулировочные винты, расположенные на предметном столике.

4. Положить на вспомогательную пластинку испытуемый образец. Фокусировка микроскопа нарушится.

5. Вращая рукоятку микрометрической фокусировки (против часовой стрелки), вновь получить отчетливое изображение штрихов. При этом необходимо отсчитывать полное число оборотов барабана N и значение барабана K , на которое указывает отсчетная риска.

6. Вычислить значение Y : $Y = (0.1 N + 0.01 K)$ мм. Результат записать в таблицу 1.

Измерения пп. 1÷6 повторить не менее 5 раз.

Для каждой пары отсчетов H и Y вычислить показатель преломления n . Найти среднее значение \bar{n} и вычислить случайную погрешность измерения Δn :

$$\Delta n = t_{pm} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\bar{n} - n_i)^2}{m(m-1)}},$$

где t_{pm} - коэффициент Стьюдента, m – количество измерений. Результат измерений записать в виде:

$$n = \bar{n} \pm \Delta n$$

Описанным выше способом определить показатель преломления каждой из других предложенных пластинок.

Таблица 1.

Вещество:							
m	H	N	K	Y	n	$(\bar{n} - n_i)$	$(\bar{n} - n_i)^2$
1							
·							
·							
m							

Дополнительное задание

Используя измеренные значения показателя преломления стекла и плексигласа, рассчитайте кажущееся уменьшение толщины двухслойной системы: стекло-плексиглас. Результат проверьте экспериментально.

Контрольные вопросы

Сформулируйте законы геометрической оптики. Укажите границы применимости этих законов.

Дайте определение абсолютного и относительного показателя преломления и покажите связь между ними.

Каков физический смысл показателя преломления с точки зрения волновой теории света? Установите связь между показателем преломления и длиной волны в вакууме и среде.

Укажите основные причины погрешностей измерения.

Как влияет на результат измерений воздушная прослойка между вспомогательной и испытуемой пластинами?

Литература

1. С.Э. Фриш, А.В. Тиморева. Курс общей физики // СПб.: Издательство "Лань", 2006, т.3, §251.
2. Д.В. Сивухин. Общий курс физики // М.: Физматлит, Издательство МФТИ, 2002, т.4, §2.