

Министерство образования и науки Российской Федерации

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

**(ТУСУР)**

**Кафедра Сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники  
(СВЧиКР)**

Метрология в оптических телекоммуникационных системах

**ИЗУЧЕНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ИНФОРМАЦИОННО-  
ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ  
ЛИНИЙ СВЯЗИ**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к лабораторной работе для бакалавров, направления 210700.62  
"Инфокоммуникационные технологии и системы связи", профиль  
"Оптические системы и сети связи"

2014

Министерство образования и науки Российской Федерации

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ  
(ТУСУР)**

**Кафедра Сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники  
(СВЧиКР)**

УТВЕРЖДАЮ  
Зав. каф. СВЧиКР

\_\_\_\_\_ Шارانгович С.Н.  
“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2014г.

Метрология в оптических телекоммуникационных системах

**ИЗУЧЕНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ИНФОРМАЦИОННО-  
ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ  
ЛИНИЙ СВЯЗИ**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
к лабораторной работе для бакалавров, направления 210700.62  
"Инфокоммуникационные технологии и системы связи", профиль  
"Оптические системы и сети связи"

Разработчик:

Профессор каф.СВЧиКР  
\_\_\_\_\_ А.П. Коханенко

проф. кафедры СВЧиКР  
\_\_\_\_\_ А.Е. Мандель

2014

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение .....	4
2. Распространение света в оптических волокнах .....	4
3. Причины появления ошибок в цифровой оптической системе связи.....	9
4. Описание компьютерного эксперимента.....	11.
5. Задание к работе.....	12
6. Контрольные вопросы.....	13
7. Список литературы.....	13

## 1. ВВЕДЕНИЕ

**Цель работы:** изучение вопросов, связанных с особенностями распространения и механизмами потерь при передаче информации в волоконно-оптическом тракте. Исследование факторов, обуславливающих информационно-пропускную способность волоконно-оптической линии связи (ВОЛС).

## 2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТА В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ

Распространение света в волокне можно трактовать как распространение световых лучей, подчиняющихся законам геометрической оптики, т.е. используя лучевое приближение. При этом предполагают, что электромагнитное поле является таким же, как и в плоской волне, а траектория луча перпендикулярна поверхности равных фаз волны, т.е. поверхности ее волнового фронта.

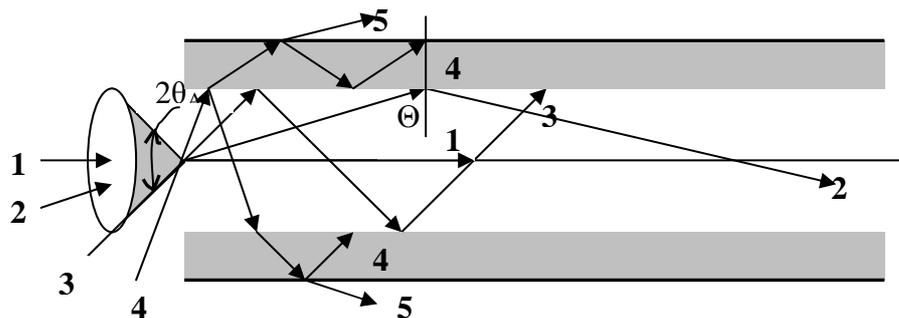


Рис.1. Распространение света в оптическом волокне

На рис. 1 показаны продольное осевое сечение ступенчатого волокна и процесс распространения световых лучей в оптическом волокне.

При попадании светового луча на торец ОВ в нем могут появиться три типа световых лучей: направляемые (лучи 1,2,3), вытекающие – лучи оболочки (луч 4), и излучаемые, которые излучаются из оболочки в окружающее пространство (луч 5). Очевидно, что излучаемые и вытекающие волны – это паразитные волны, приводящие к рассеиванию энергии и искажению информационного сигнала.

Направляемые лучи в зависимости от траектории следует разделить на меридианные и косые световые лучи. Траектория меридианных лучей лежит в плоскости, проходящей через ось волокна и имеет зигзагообразный вид (лучи 2,3). Косые лучи распространяются по спиралеобразной траектории, проекция которой на поперечное сечение волокна имеет вид правильного незамкнутого треугольника.

Меридианные световые лучи характеризуются углом падения на оболочку  $\theta_m$ , образованным лучом и нормалью к оси волокна. Критический режим соответствует условию

$$\sin\theta_{кр} = n_u / n_c, \quad (1)$$

где  $\theta_{кр}$  – угол полного внутреннего отражения,  $n_c, n_u$  – показатели преломления сердцевины и оболочки соответственно.

При выполнении условия  $\theta_m < \theta_{кр}$  луч распространяется вдоль сердцевины волокна и может обеспечить передачу сигнала на большие расстояния.

Угол  $\theta_A$  между оптической осью и одной из образующих светового конуса – лучей, падающих на торец оптического волокна, для которых в дальнейшем выполняется условие полного внутреннего отражения, носит название апертуры ОВ. Физически апертура характеризует эффективность ввода оптического излучения в волокно, а для ее числовой оценки используется понятие номинальной числовой апертуры (Numerical Aperture), значение которой для ступенчатого оптического волокна определяется выражением

$$NA = n_0 \sin \theta_A, \quad (2)$$

где  $n_0$  – показатель преломления окружающей среды, для воздуха  $n_0=1$ .

В соответствии с законом Снеллиуса для лучей на входном торце оптического волокна можно записать:

$$n_0 \sin \theta_A = n_c \sin (\pi/2 - \theta_{кр}),$$

и, учитывая, что

$$\theta_{кр} = \arcsin (n_u / n_c),$$

выражение для номинальной числовой апертуры примет вид

$$NA = \sqrt{n_c^2 - n_u^2} \approx n_c \cdot \sqrt{\Delta}, \quad (3)$$

где  $\Delta = (n_c^2 - n_u^2)/2n_c^2 \approx (n_c - n_u)/n_c$  называется относительной разностью показателей преломления сердцевины и оболочки оптического волокна.

Из последнего выражения видно, что с увеличением разности показателей преломления сердцевины и оболочки значение NA возрастает и, следовательно, улучшается эффективность ввода излучения в оптическое волокно.

Если по аналогии со случаем, показанным на рис. 1, в волокно одновременно введены несколько лучей под разными углами, то на выходе волокна два соседних из них оказываются разделенными во времени. В результате имеющий структуру импульса световой пучок, содержащий лучи под всеми возможными углами, окажется размытым во времени в процессе своего распространения по волокну. Это уширение светового импульса определяет межмодовую (многолучевую) временную дисперсию волокна.

Межмодовая дисперсия возникает из-за различия времени пробега распространяющихся по волокну мод. Согласно геометрической интерпретации распространение светового импульса по многомодовому волокну может быть представлено в виде набора аксиальных и наклонных лучей, каждый из которых соответствует определенной моде (рис.2).

Время пробега аксиальным лучом расстояния  $L$  определяется выражением

$$t_a = \frac{L}{V_\phi} = \frac{Ln_c}{c}, \quad (4)$$

где  $V_\phi$  - фазовая скорость,  $n_c$  - показатель преломления сердцевины,  $c$  - скорость света в вакууме.

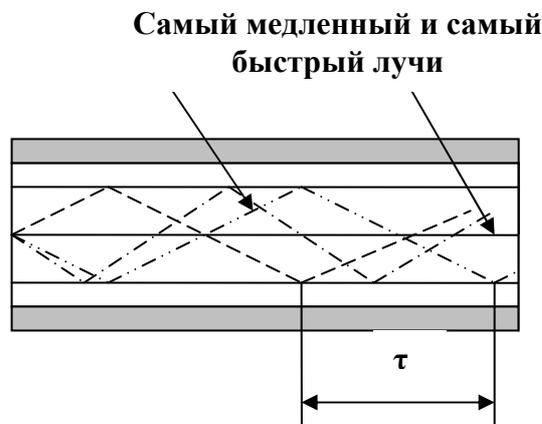


Рис.2. Распространение светового импульса по многомодовому волокну

Время пробега того же расстояния  $L$  наклонным лучом с максимально возможным значением критического угла  $\theta_{кр}$  составляет

$$t_n = \frac{Ln_c}{c \cos \theta_{кр}} = \frac{n_c^2 L}{n_u c}, \quad (5)$$

где  $n_u$  - показатель преломления оболочки.

Когда эти два луча, переносящие световую энергию, складываются на выходе световода, наклонный луч имеет временное запаздывание  $\tau_{мм}$ :

$$\tau_{мм} = t_n - t_a = \frac{n_c L}{n_u c} (n_c - n_u). \quad (6)$$

При этом запаздывание на единицу длины пути будет:

$$\frac{\tau_{мм}}{L} = \frac{n_c}{n_u c} (n_c - n_u). \quad (7)$$

Для типичного волокна со ступенчатым профилем показателя преломления, имеющего  $n_c = 1,5$  и разность показателей преломления сердцевины и оболочки  $\Delta n \approx 0,01$ , временная задержка  $\tau_{мм}$  между самым

быстрым и самым медленным лучами составляет около 50 нс/км. Различие времени пробега распространяющихся по волокну мод приводит к искажению формы (расширению) выходного импульса по сравнению с входным. В многомодовых световодах со ступенчатым профилем показателя преломления вклад межмодовой дисперсии является основным в расширении импульсов передачи и ограничении ширины полосы пропускания.

Межмодовую дисперсию многомодового световода можно уменьшить, используя градиентные волокна с плавным изменением профиля показателя преломления. За счет уменьшения показателя преломления от оси ОВ к оболочке скорость распространения лучей, удаленных от оси, увеличивается и время распространения аксиальных и наклонных лучей выравнивается. При оптимальном профиле показателя преломления, близком к параболическому, значение межмодовой дисперсии определяется выражением

$$\tau_{мм} = t_n - t_a = \frac{n_c L}{8c} (n_c - n_u)^2. \quad (8)$$

При этом временная задержка  $\tau_{мм}$  между самым быстрым и самым медленным лучами при  $n_c = 1,5$  и  $\Delta n \approx 0,01$  уменьшается до 62,5 пс/км.

Частотные свойства многомодовых волокон из-за преобладания межмодовой составляющей дисперсии мало зависят от спектральных свойств источника излучения. Поэтому их удобно оценивать коэффициентом широкополосности  $B$  (МГц·км), который является эквивалентом дисперсии в частотной области. Для пересчета коэффициента широкополосности в дисперсию и обратно можно использовать соотношение

$$B = \frac{1}{\tau_{мм}}. \quad (9)$$

Современные многомодовые волокна имеют на основных рабочих длинах волн типовое значение коэффициента широкополосности  $B = 200 \dots 1000$  МГц·км.

В одномодовых оптических волокнах основным видом дисперсии является хроматическая дисперсия. Под названием «хроматическая дисперсия» объединены две составляющие дисперсии: а) материальная дисперсия (зависимость коэффициента преломления материала световода от длины волны света); б) волноводная (внутримодовая) дисперсия (зависимость групповой скорости моды от длины волны света).

Материальная дисперсия является фундаментальной характеристикой материала световода. Любой сигнал, налагаемый на световую волну, распространяются не с фазовой скоростью волны, равной

$$V_{\phi} = \frac{\omega}{\beta},$$

где  $\omega$  - частота,  $\beta$  – постоянная распространения, а с групповой скоростью, определяемой соотношением:

$$V_{gp} = \frac{d\omega}{d\beta}.$$

В недисперсионных средах фазовая скорость не зависит от частоты световой волны, вследствие чего групповая  $V_{gp}$  и фазовая  $V_{\phi}$  скорости одинаковы. Однако в дисперсионных средах, где показатель преломления является функцией частоты  $n(\omega)$ , фазовая и групповая скорости различаются. Время  $t$  распространения светового импульса через дисперсионную среду длиной  $L$  определяется формулой:

$$t = \frac{L}{V_{gp}} = \frac{NL}{c} = \frac{L}{c} \left( n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \right). \quad (10)$$

Как видно из последней формулы, время  $t$  определяется зависимостью показателя преломления среды  $n$  от длины волны света  $\lambda$ . У реальных источников света спектр излучения не бесконечно узкий, а составляет определенную ширину  $\Delta\lambda$ . Если среда дисперсионная, то скорость распространения спектральных составляющих источника излучения различна. В процессе распространения в волокне световой импульс расширяется и поступает на выход на протяжении интервала времени  $\tau_m$ , определяемого соотношением:

$$\tau_m = \frac{dt}{d\lambda} \Delta\lambda = -\frac{L}{c} \lambda \frac{d^2 n_c}{d\lambda^2} \Delta\lambda. \quad (11)$$

Необходимо отметить, что для кварцевого оптического волокна зависимость  $d^2 n_c / d\lambda^2$  изменяет свой знак при длине волны  $\lambda = 1,28 \mu\text{м}$ . Эта точка носит название нулевой материальной дисперсии.

Вторая составляющая хроматической дисперсии - внутримодовая дисперсия - обусловлена направляющими свойствами сердцевины оптического волокна, а именно зависимостью групповой скорости моды от длины волны оптического излучения  $\lambda$ , что приводит к различию скоростей распространения частотных составляющих излучаемого спектра. Поэтому внутримодовая дисперсия в первую очередь определяется профилем показателя преломления оптического волокна и пропорциональна ширине спектра излучения источника. Задержка частотных составляющих распространяющегося в волокне излучения за счет внутримодовой дисперсии определяется выражением:

$$\tau_g = \Delta\lambda L M(\lambda), \quad (12)$$

где  $M(\lambda)$  – удельная внутримодовая дисперсия.

В нормальных условиях материальная дисперсия преобладает над волноводной, причем они могут иметь противоположные знаки и различаться характером зависимости от длины волны. Это позволяет, варьируя профиль показателя преломления, получить нулевую хроматическую дисперсию на заранее заданной длине волны  $\lambda$  или же в определенной спектральной полосе за счет взаимной компенсации материальной и волноводной дисперсии. Так как хроматическая дисперсия зависит от длины световой волны и, следовательно, от ширины спектра источника оптического излучения, она нормируется в пс/(нм·км).

Наличие дисперсии любого вида в оптическом волокне ограничивает его информационно-пропускную способность. Другой причиной ограничения информационно-пропускной способности оптических волокон являются потери мощности передаваемого оптического сигнала. Потери света в волокне обусловлены его поглощением и рассеянием в процессе распространения по волокну. Материал, пригодный для изготовления оптического волокна, должен иметь высокую прозрачность для оптического излучения в области 1 мкм. Фундаментальные потери в стеклах имеют место на краю ультрафиолетовой области спектра, где происходят квантовые переходы, связанные с перестройкой электронных структур атома, и на краю инфракрасной области, которому соответствуют колебания самих атомов в решетке. Значительное влияние на дисперсию и потери в волокне оказывают примеси, которые формируют дополнительный набор резонансных частот волокна. К наиболее важным примесям относят такие, как окислы Ge, В, Р, а также ОН. Микроскопические дефекты в структуре волокна его изгибы и микроизгибы, а также неупорядоченность структуры стеклообразных материалов ведут к рассеянию света.

### **3. ПРИЧИНЫ ПОЯВЛЕНИЯ ОШИБОК В ЦИФРОВОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ СВЯЗИ**

В цифровой оптической системе связи поток данных (в двоичной системе счисления) передается путем модуляции оптического излучения таким образом, что излучаемая энергия во время передачи одного бита равна какому-либо из двух уровней, высокому или низкому.

В реальной системе связи:

- а) время передачи бита информации не остается постоянным; этот эффект называют фазовым дрожанием цифрового сигнала;
- б) излучаемая оптическая энергия не остается одной и той же при передаче как каждой единицы, так и каждого нуля, поэтому будет иметь место шум

передатчика, приводящий к случайным изменениям амплитуды сигнала от импульса к импульсу;

в) конечная длительность излучаемых импульсов и дополнительная временная дисперсия в процессе их распространения приводят к тому, что часть энергии, относящаяся к периоду передачи определенного бита, в действительности поступает во время передачи соседних битов. Этот эффект называют взаимными помехами между символами (межсимвольные помехи).

Эти и другие эффекты увеличивают критичность процесса регенерации цифрового сигнала в блоке принятия решения.

Имеющуюся связь между чувствительностью к случайному изменению амплитуды (шуму) и чувствительностью к случайному изменению временного положения импульса (дрожанию) легче всего продемонстрировать с помощью "глаз-диаграммы". Чтобы наблюдать такую диаграмму на экране осциллографа, достаточно подать на вход вертикального отклонения сообщение, усиленное фотоприемником, а на вход внешней синхронизации горизонтальной развертки-синхроимпульсы. На рис.3 показан возможный вид "глаз-диаграммы" двухуровневого сигнала.

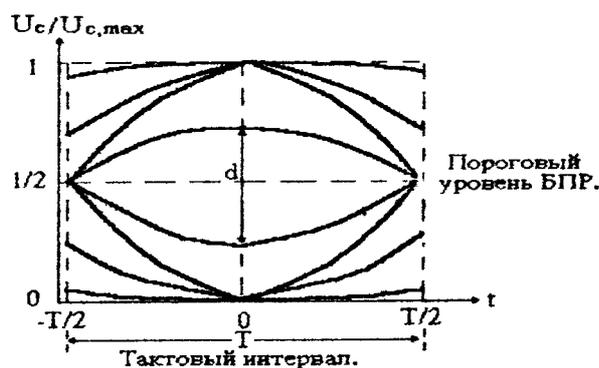


Рис.3. "Глаз-диаграмма"

По оси ординат отложено относительное напряжение сигнала на входе блока принятия решений(БПР). Таким образом, "0" или "1" на оси ординат соответствует максимальному уровню единицы и минимальному уровню нуля. Буквой d обозначен относительный раскрыв диаграммы, которое показывает максимальное уменьшение размаха сигнала вследствие влияния межсимвольной интерференции ( $0 \leq d \leq 1$ ). Минимальная вероятность ошибки будет достигнута, если отсчет произойдет в момент стробирования при максимальном сигнале. Порог находится в пределах зрачка d, и зависит от отношения сигнал/шум на входе фотоприёмного устройства. Ширина зрачка "глаз-диаграммы"  $\Delta t_3$  характеризует интервал времени, в пределах которого может произойти

стробирование. Чем меньше этот интервал, тем выше требования к стабильности синхронизации посылок и момента появления синхроимпульсов (влияние фазового дрожания сигнала).

#### 4. ОПИСАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Компьютерный эксперимент осуществляет построение "глаз-диаграммы" для цифрового сигнала, представляющего собой случайную последовательность посылок  $h(t)$

$$U_c = \sum_{k=-\infty}^{\infty} b_k \cdot h(t - T_k).$$

Здесь  $k$ -индекс суммирования, коэффициент  $b_k$  принимает значение 0 или 1. Ограничившись взаимным влиянием в пределах пяти тактовых интервалов  $T$  получаем:

$$U_c \approx b_0 \cdot h(0) + b_1 \cdot h(t - T) + b_2 \cdot h(t - 2 \cdot T) + b_1 \cdot h(t + T) + b_2 \cdot h(t + 2 \cdot T).$$

Максимум напряжения в момент стробирования получается при передачи последовательности одних единиц. Считая  $h(t)$  четной функцией, получаем:

$$U_{c \max} = h(0) + 2 \cdot h(T) + 2 \cdot h(2 \cdot T).$$

"Глаз-диаграмма" представляет собой набор нормированных графиков в интервале  $-T/2 \leq t \leq T/2$  для всевозможных сочетаний символов посылок гауссовой формы:

$$h(t) = \exp \left[ -\frac{t^2}{2 \cdot \alpha^2 \cdot T^2} \right],$$

где  $\alpha$  - коэффициент, характеризующий эффективную длительность посылки, измеренной на уровне 1/2. В ходе моделирования расчет производится для 21 значения времени и 16 сочетаний символов для каждого временного отчета. Программа реализована на языке PASCAL, имя программы DIAGRAM.exe.

После активизации программы выполняется контрольная задача. На экране возникает изображение "глаз-диаграммы" для идеального случая, когда не происходит наложения между импульсами посылок (отсутствует межсимвольная интерференция) и нет влияния шума.

В реальных ВОЛС имеет место взаимообмен энергией между импульсами за счет того, что дисперсия в волокне приводит к уширению

передаваемых импульсов и, соответственно к увеличению эффективной длительности посылки  $\alpha$ .

Если преобладающей является межмодовая дисперсия, то зависимость от частоты носит параболический характер, а если преобладает материальная - сложный, обусловленный различными механизмами потерь и поглощения. Т.к. с ростом частоты увеличивается влияние межсимвольной помехи за счет роста  $\alpha$ , раскрыв "глаз-диаграммы", характеризуемый параметром  $d$ , уменьшается. Заметим, что положение порогового уровня ФПУ находится в пределах этого раскрыва и зависит от отношения сигнал/шум на входе приемного элемента. В реальности существующие шумы фотоприемника определяют отношение сигнал/шум ФПУ, поэтому влияние этих шумов становится заметным на раскрыв "глаз-диаграммы" и, следовательно, на положение порогового уровня ФПУ.

## 5. ЗАДАНИЕ К РАБОТЕ

1. Снимите зависимость относительного раскрыва "глаз-диаграммы"  $d$  от частоты в пределах 0.1-100 МГц с шагом 5 МГц для пяти значений сигнал/шум (1,10,25,50 дБ).

2. Снимите зависимость относительного раскрыва "глаз-диаграммы" от отношения сигнал/шум для пяти значений частот (1,10,25,50,80 МГц).

3. Снимите зависимость параметра  $\alpha$  от частоты в пределах 0.1-100 МГц с шагом 5 МГц.

ЗАМЕЧАНИЕ: в ходе моделирования параметр  $\alpha$  выводится на экран; параметр  $d$  оценивается по масштабной сетке вдоль оси ординат ( $d_{\max}=1$ ).

4. Проанализировав полученные результаты, определите какое минимальное отношение сигнал/шум приемного элемента ФПУ необходимо выбрать, зная верхнюю и нижнюю границы частоты, чтобы раскрыв "глаз-диаграммы"  $d$  был не менее критической величины  $d_{\text{кр}}$ . Величина  $d_{\text{кр}}$  задается преподавателем.

5. Полагая, что преобладающей в оптическом волокне является межмодовая дисперсия и используя (11), (15), численно определите эту дисперсию на основе зависимости  $\alpha(f)$

Начальную эффективную длительность посылок считать малой по сравнению с конечной.

## 6.

## 7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие приближения использует геометрическая оптика?
2. Объясните различие межмодовой и материальной дисперсий.
3. Можно ли свести к нулю материальную дисперсию?
4. Какие факторы влияют на информационно-пропускную способность ВОЛС?
5. Какими параметрами "глаз-диаграммы" характеризуется устойчивость системы к шуму, фазовому дрожанию сигнала?

## 8. ЛИТЕРАТУРА

1. Мандель А.Е. Методы и средства измерения в волоконно-оптических линиях связи [Электронный ресурс]: Уч. пособие. - Электрон. текстовые дан. - Томск: ТУСУР, 2012. – 123 с. – Режим доступа: <http://edu.tusur.ru/training/publications/771>.
2. Бакланов И. Г. Тестирование и диагностика систем связи: научное издание.- М.: Эко-Трендз, 2006. - 268 с.
3. Современные проблемы волоконно-оптических линий связи: Справочник. Т. 4: Активные элементы и средства контроля ВОЛС. Под ред. В. Ф. Мышкина, В. А. Хана, А. В. Шмалько. Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2005г. -371 с.