

**СУРГУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**Инженерно-физический факультет**

**Кафедра экспериментальной физики**

**Методические указания к выполнению  
курсовой работы по дисциплине  
«Оптические системы связи»  
для бакалавров направления  
«Информационные технологии и системы связи»**

**Составил:**

**к.ф.-м.н., доцент**

**С.М.Сысоев**

**Сургут, 2007**

## Расчет параметров волоконных световодов

### 1. Расчет показателя преломления компонентов волоконного световода

При оценки показателя преломления стекол необходимо учитывать его зависимость от длины волны, т.е. спектральную зависимость, которая для диапазона длин волн 0,6-2,0 мкм характеризуется трехчленной формулой Селмейера :

$$n^2(\lambda) = 1 + \sum_{i=1}^3 A_i \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - I_i^2},$$

где  $A_i$  и  $I_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) - коэффициенты, значения которых находятся экспериментально;  $\lambda$  - длина волны, мкм.

Для изготовления световодов применяют кварцевые стекла с добавками окиси германия, фосфора, повышающими показатель преломления кварца, и добавками окиси бора, фтора, понижающими показатель преломления стекла. Значения коэффициентов  $A_i$  и  $I_i$  для стекол различных составов приведены в табл. 1.

При определении показателя преломления основных компонентов волоконного световода, необходимо учитывать, что в качестве материала светоотражающей оболочки, как правило, применяется чистое кварцевое стекло ( $\text{SiO}_2$ ), а для изготовления сердечника - легированный кварц.

Таблица 1

Значения коэффициентов  $A_i$  и  $I_i$  для стекол различных составов

Состав стекла	Тип коэффициента	Значение коэффициента при $i$ , равном		
		1	2	3
SiO <sub>2</sub>	$A_i$	0,6961663	0,4079426	0,8974794
	$I_i$	0,0684043	0,1162414	9,896161

13,5% G <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 86,5% SiO <sub>2</sub>	$A_i$ $I_i$	0,73454395 0,08697693	0,42710828 0,11195191	0,82103399 10,846540
9,1% G <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 7,7% B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 83,2% SiO <sub>2</sub>	$A_i$ $I_i$	0,72393884 0,085826532	0,41129541 0,10705260	0,79292034 9,3772959
13,5% Be <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 86,5% SiO <sub>2</sub>	$A_i$ $I_i$	0,67626834 0,076053015	0,42213113 0,11329618	0,58339770 7,8486094
3,1% G <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 96,9% SiO <sub>2</sub>	$A_i$ $I_i$	0,7028554 0,0727723	0,4146307 0,1143085	0,8974540 9,896161
3,0% Be <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 97,0% SiO <sub>2</sub>	$A_i$ $I_i$	0,6935408 0,0717021	0,4052977 0,1256396	0,9111432 9,896154
3,3% G <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 9,2% B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 87,5% SiO <sub>2</sub>	$A_i$ $I_i$	0,6958807 0,0665654	0,4076588 0,1211422	0,9401093 9,896140
SiO <sub>2</sub> (с гасящими добавками)	$A_i$ $I_i$	0,696750 0,069066	0,408218 0,115662	0,890815 9,900559
9,1% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 90,9% SiO <sub>2</sub>	$A_i$ $I_i$	0,695790 0,061568	0,452497 0,119921	0,712513 8,656641
1,0% F 99,0% SiO <sub>2</sub>	$A_i$ $I_i$	0,691116 0,068227	0,399166 0,116460	0,890423 9,993707
16,9% NaO <sub>2</sub> 32,5% B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 50,6% SiO <sub>2</sub>	$A_i$ $I_i$	0,796468 0,094359	0,497614 0,093386	0,358924 5,999652

Оптические свойства выбранных материалов сердечника и оболочки должны обеспечивать одномодовый режим работы волоконного световода. Для этого необходимо рассчитать значение нормированной (характеристической) частоты:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

где  $a$  - радиус сердечника световода, мкм;  $\lambda$  - длина волны, мкм;  $n_1$  - показатель преломления сердечника;  $n_2$  - показатель преломления оболочки.

Если нормированная частота  $V < 2,405$ , то в световоде распространяется лишь один тип волны  $HE_{11}$ , и компоненты волоконного световода выбраны правильно.

Если  $V \geq 2,405$ , то в световоде устанавливается многомодовый режим работы. Тогда необходимо осуществить повторный выбор материалов сердечника и оболочки, которые обеспечивали бы существование лишь одной моды в оптическом волокне.

## 2. Расчет числовой апертуры световода

Важной характеристикой световода является числовая апертура  $NA$  (Numerical Aperture), которая представляет собой синус от апертурного угла ( $\varphi_m$ ).

Апертурный угол - это угол между оптической осью и одной из образующих светового конуса, воздействующего на торец световода.

Числовая апертура рассчитывается по формуле :

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \sqrt{2\Delta}$$

где  $\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}$  - относительная разность показателей преломления.

От значения  $NA$  зависят эффективность ввода излучения лазера в световод, потери на микроизгибах, дисперсия импульсов, число распространяющихся мод.

Чем больше у волокон  $\Delta$ , тем больше  $NA$ , чем легче осуществлять ввод излучения от источников света в световод.

Оптические кабели применяемые для магистральной связи должны иметь числовую апертуру  $NA < 0,2$ .

### 3. Расчет затухания световодов

Важнейшими параметрами световода является оптическое потери и соответственно затухание передаваемой энергии. Эти параметры определяют дальность связи по оптическому кабелю и его эффективность.

Затухание световодных трактов обусловлено собственными потерями в волоконных световодах ( $\alpha_c$ ) и дополнительными потерями, так называемыми кабельными ( $\alpha_k$ ), обусловленными деформацией и изгибами световодов при наложении покрытий и защитных оболочек в процессе изготовления оптического кабеля, т.е.

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_k.$$

Собственные потери волоконных световодов состоят в первую очередь из потерь поглощения ( $\alpha_n$ ) и потерь рассеивания  $\alpha_p$ , т.е.

$$\alpha_c = \alpha_n + \alpha_p.$$

Под кабельными потерями понимают потери энергии на макроизгибы и микроизгибы:

$$\alpha_k = \alpha_{macro} + \alpha_{micro}.$$

Таким образом, полные потери в волоконном световоде составят:

$$\alpha = \alpha_n + \alpha_p + \alpha_{macro} + \alpha_{micro}.$$

Затухание в результате поглощения связано с потерями на диэлектрическую поляризацию и существенно зависит от свойств материала световода :

$$\alpha_n = 8,69 \frac{\pi n_1 10^9}{\lambda} \text{tg} \delta, \text{ дБ/км}$$

где  $n_1$  - показатель преломления сердечника;  $\lambda$  - длина волны, мкм;  $\text{tg} \delta$  - тангенс угла диэлектрических потерь в световоде, равный  $2,4 \cdot 10^{-12}$ .

Затухание на рассеяние рассчитывается по формуле :

$$\alpha_p = 4,34 \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} (n_1^2 - 1)KT\chi 10^3, \text{ дБ/км}$$

где  $K$  - постоянная Больцмана,  $K = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;  $T$  - температура перехода стекла в твердую фазу,  $T = 1500$  К;  $\chi$  - коэффициент сжимаемости,  $\chi = 8,1 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/Н;  $\lambda$  - длина волны, м.

Потери на макроизгибы обусловлены скруткой волоконных световодов по геликоиде вдоль всего оптического кабеля и для ступенчатых стекловолокон рассчитываются по формуле :

$$\alpha_{macro} = \frac{26 \cdot 10^{-3} a}{\Delta d \left[ 1 + \left( \frac{s}{\pi d} \right)^2 \right]}, \text{ дБ/км,}$$

где  $a$  - радиус сердечника, мкм;  $\Delta$  - относительная разность показателей преломления,  $d$  - диаметр скрутки, мм;  $S$  - шаг скрутки, мм.

Отношение  $S/d$  называется параметром устойчивости скрутки, который в оптических кабелях находится в пределах 12 - 30.

Дополнительное затухание за счет излучения при микроизгибах для одномодовых световодов рассчитывается по формуле :

$$\alpha_{micro} = 2 \cdot 10^{-4} \frac{ka^4}{b^6 \Delta^3} \frac{\varpi_0^6}{\lambda^4}, \text{ дБ/км,}$$

где  $k$  - коэффициент, зависящий от длины и амплитуды микроизгибов,  $k=10-15$ ;  $a$  - радиус сердечника стекловолокна, мкм;  $b$  - диаметр оболочки, мкм;  $\lambda$  - длина волны, мкм.

$\varpi_0$  - радиус поля моды, мкм,

$$\varpi_0 = a \left( 0,65 + 1,61V^{-1,5} + 2,879V^{-6} \right), \quad V \approx \frac{12,97 a \sqrt{\Delta}}{\lambda}$$

#### 4. Расчет дисперсии оптического волокна

В световодах при передаче импульсных сигналов после прохождения некоторого расстояния импульсы искажаются, расширяются и наступает момент, когда соседние импульсы перекрывают друг друга. Данное явление в теории световодов носит название дисперсии.

Расширение импульсов устанавливает предельные скорости передачи информации по световоду при импульсно-кодовой модуляции и при малых потерях ограничивает длину участка регенерации. Дисперсия ограничивает также пропускную способность волоконно-оптических систем передачи, которая предопределяет полосу частот, пропускаемую световодом, ширину линейного тракта и соответственно объем информации, который можно передать по оптическому кабелю.

Дисперсия возникает по двум причинам: некогерентность источников излучения и появление спектра  $\Delta\lambda$ , существование большого числа мод.

Первая называется хроматической (частотной) дисперсией, которая делится на материальную и волноводную. Материальная дисперсия обусловлена зависимостью коэффициента преломления материала световода от длины волны. Волноводная дисперсия обусловлена процессами внутри моды и связана со световодной структурой моды. Она характеризуется зависимостью коэффициента распространения моды от длины волны.

Второй вид дисперсии носит название модовой, которая, однако, в одномодовых световодах отсутствует полностью.

В одномодовых световодах проявляются материальная и волноводная дисперсии, расчет которых производится по формулам :

$$\tau_m = \Delta\lambda \cdot M(\lambda), \text{ пс/км,}$$

$$\tau_s = \Delta\lambda \cdot B(\lambda), \text{ пс/км,}$$

где  $\Delta\lambda$  - ширина спектра излучения источника, при использовании в качестве источника излучения полупроводникового инжекционного лазера,  $\Delta\lambda = 0,1 - 4$  нм;  $M(\lambda)$  - удельная дисперсия материала;  $B(\lambda)$  - удельная волноводная дисперсия.

Коэффициент удельной материальной дисперсии рассчитывается по формуле :

$$M(\lambda) = \frac{\lambda}{c} \frac{\sum \frac{A_i I_i^2 (3\lambda^2 + I_i^2)}{(\lambda^2 - I_i^2)^3} - \left( \frac{\partial n}{\partial \lambda} \right)^2}{n_1(\lambda)} 10^9, \text{ пс/(км нм)}$$

где  $\lambda$  - длина волны, мкм;  $c$  - скорость света,  $c = 300000$  км/с;  $n_1(\lambda)$  - показатель преломления сердечника;  $A_i$  и  $I_i$  - коэффициенты выбираются из табл. 1 в зависимости от состава стекла сердечника в полном соответствии с предварительно выполненными расчетами  $n_1$ .

Производная  $\frac{\partial n}{\partial \lambda}$  рассчитывается по формуле:

$$\frac{\partial n}{\partial \lambda} = - \frac{\lambda}{n_1(\lambda)} \sum_{i=1}^3 \frac{A_i I_i^2}{(\lambda^2 - I_i^2)^2}$$

Коэффициент удельной волноводной дисперсии рассчитывается по формуле :

$$B(\lambda) = \frac{2n_1^2(\lambda)\Delta}{\lambda c} 10^9, \text{ пс/(км нм)}$$

где  $\lambda$  - длина волны, мкм;  $\Delta$  - относительная разность показателей преломления.

Полное уширение импульса за счет материальной и волноводной дисперсий, приходящееся на 1 км оптической магистрали, определится:

$$\tau = \left| \tau_m + \tau_s \right|, \text{ пс/км.}$$

Хроматическая дисперсия существенно ограничивает пропускную способность волоконных световодов. Максимальная ширина полосы пропускания на 1 км оптической линии приблизительно определяется по формуле:

$$\Delta F = \frac{0,44}{\tau} 10^{12}, \text{ Гц км.}$$

## 5. Определение длины регенерационного участка

Исходя из экономичности оптической магистрали и качества передачи информации, желательно, чтобы длина участка регенерации была максимальной.

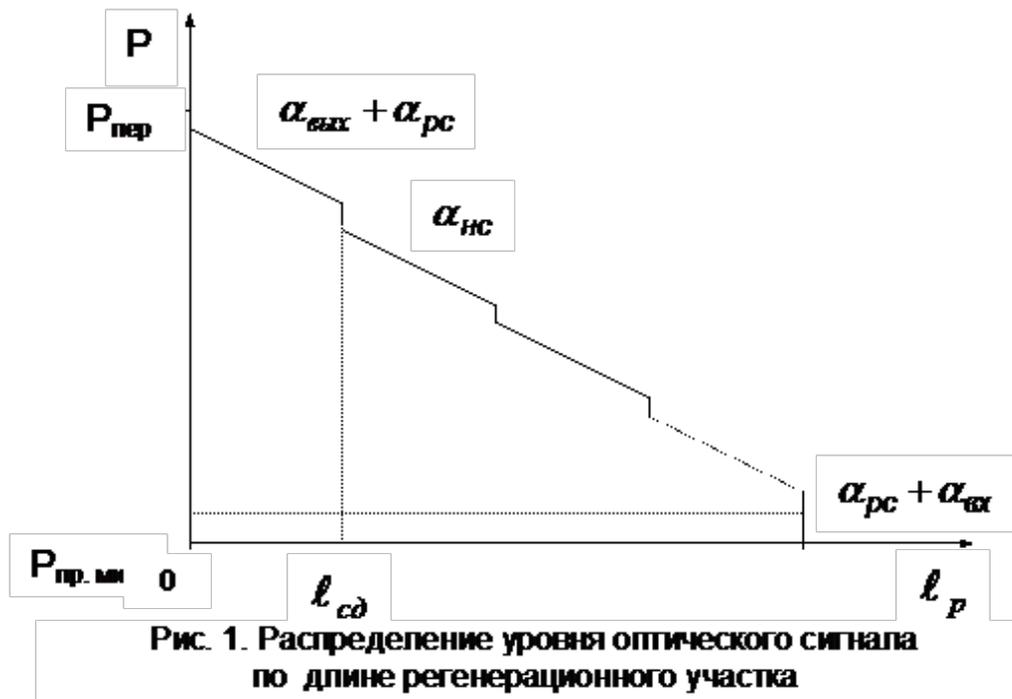
Длина регенерационного участка для выбранной аппаратуры передачи и заданном качестве связи определяется характеристиками оптического кабеля: затуханием и дисперсией. Затухание лимитирует длину участка по потерям в тракте передачи. Дисперсия приводит к расширению импульсов, которое возрастает с увеличением длины линии, что приводит к повышению вероятности ошибки передаваемой информации.

### 5.1. Определение длины регенерационного участка по затуханию оптического кабеля.

Уровень оптического сигнала с увеличением расстояния от начала регенерационного участка уменьшается в соответствии с графиком, представленным на рис. 1, из которого следует:

$$P_{пр.мин} = P_{пер} - \alpha_{вх} - 2\alpha_{рс} - \left( \frac{\ell_p}{\ell_{сд}} - 1 \right) \alpha_{нс} - \alpha \ell_p - \alpha_{вых}$$

где  $P_{пр.мин}$  - минимально допустимая мощность на входе фотоприемника, дБ м;  $P_{пр}$  - уровень мощности генератора излучения, дБ м;  $\alpha_{рс}$  - потери в разъёмном соединении используются для подключения приемника и передатчика к оптическому кабелю, дБ;  $\alpha_{вх}, \alpha_{вых}$  - потери при вводе и выводе излучения из волокна, дБ;  $\alpha_{нс}$  - потери в неразъёмных соединениях, дБ;  $\alpha$  - коэффициент ослабления оптического волокна, дБ/км;  $\ell_{сд}$  - строительная длина оптического кабеля, км.



Величина  $\Pi = P_{пер} - \alpha_{вх} - \alpha_{вых} - P_{пр.мин}$  носит название энергетического потенциала аппаратуры и определяется типом источника излучения и фотоприемника.

Из последнего выражения можно определить длину регенерационного участка, определяемого затуханием линии:

$$l_p \leq \frac{\Pi + \alpha_{нс} - 2\alpha_{рс}}{\alpha_{нс} + \alpha l_{сд}} l_{сд}, \text{ км (1)}$$

Современные способы сращивания оптических волокон, посредством сварки автоматическими устройствами, обеспечивают величину потерь на одном сростке в пределах 0,01-0,03 дБ.

Потери в лучших образцах разъемных соединителей (оптических коннекторах) составляют 0,35-0,5 дБ на одно соединение.

Расчет энергетического потенциала производится следующим образом.

Учитывая, что в аппаратуре STM в качестве источника излучения используется полупроводниковый инжекционный лазер, выходная мощность последнего составляет  $P_{пер}$ .

При использовании способа кодирования с невозвращением в нуль из выходной мощности источника излучения вычитается 3 дБм, а при коде с возвращением в нуль - 6 дБм, что обусловлено уменьшением средней излучаемой мощности кодированного сигнала по сравнению с непрерывным режимом.

Потери при вводе света в волокно для полупроводникового лазера составляют  $\alpha_{\text{вых}}=3-5$  дБ, при выводе света на фотоприемник -  $\alpha_{\text{вх}}=2-3$  дБ.

Требуемую чувствительность приемника выбирают исходя из принятой скорости передачи информации ( $B$ ) и величины коэффициента ошибок ( $p_{\text{ош}}$ ). На рис. 2 приведены зависимости чувствительности наиболее распространенных фотоприемников от скорости передачи информации ( $P_{\text{пр.мин.}}=f(B)$ ) при  $p_{\text{ош}}=10^{-9}$ .

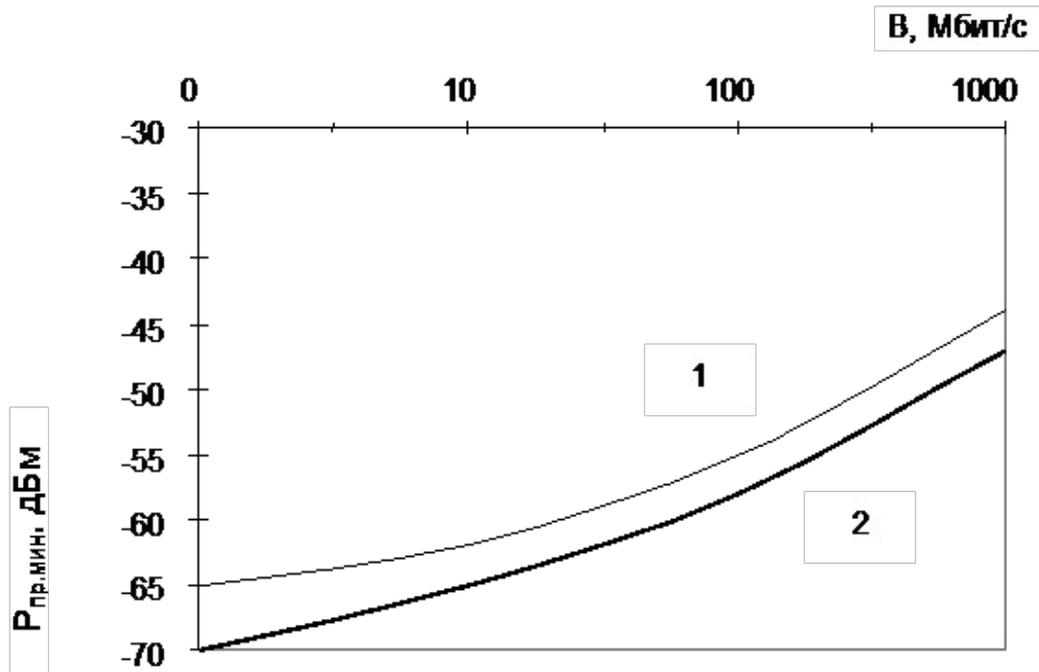


Рис. 2. Зависимость чувствительных фотоприемников от скорости передачи информации: 1 - ЛФД (Ge); 2 - ЛФД (GaInAs)

### 5.2. Определение длины регенерационного участка по пропускной способности оптического кабеля

Дисперсионные явления в волоконном световоде приводят к появлению межсимвольной интерференции, для уменьшения которой необходимо, чтобы выполнялось следующее условие :

$$B \leq \frac{0,25}{\tau}$$

где  $B$  - скорость передачи информации;  $\tau$  - уширение импульса в кабеле длиной 1 км.

Тогда длина регенерационного участка определится:

$$l_p \leq \frac{0,25 \cdot 10^6}{B\tau}, \text{ км (2)}$$

где  $B$  - скорость передачи информации, Мбит/с;  $\tau$  - уширение импульса, пс/км.

Целью расчета является определение максимальной длины

регенерационного участка  $l_p$  при условии одновременного выполнения неравенств (1) и (2).

#### Порядок выполнения

1. Произвести выбор материалов для сердечника и оболочки световода, рассчитать  $n_1$  и  $n_2$  при условии  $n_1 > n_2$  и обеспечении одномодового режима работы.
2. Определить числовую апертуру световода.
3. Определить коэффициент затухания световода.
4. Определить дисперсию световода и максимальную ширину полосы пропускания на 1 км.
5. Определить длину регенерационного участка.
6. Сделать выводы.

#### Варианты заданий

Общие данные для всех вариантов:

- Диаметр сердечника световода  $2a=8,3$  мкм;
- Диаметр оболочки световода  $b=125$  мкм;
- Диаметр скрутки  $d=160$  мм;
- Шаг скрутки  $S=80$  мм;
- Коэффициент для расчета затухания на микроизгибах  $k=15$ ;
- Строительная длина оптического кабеля  $l_{cd}=2$  км;
- Коэффициент ошибок  $p_{ош}=10^{-9}$ ;
- Скорость передачи информации  $V=622$  Мбит/с.

№ варианта	$\lambda$ , нм	$\Delta \lambda$ , нм	$P_{пер}$ , мВт	$\alpha_{вх}$ , дБ	$\alpha_{вых}$ , дБ	$\alpha_{нс}$ , дБ	$\alpha_{рс}$ , дБ	Способ кодирования
1	1300	0,1	13	2	4	0,02	0,4	С невозвращением в нуль
2	1550	0,1	13	2	4	0,02	0,4	С возвращением в нуль
3	1300	0,2	15	2	4	0,02	0,4	С невозвращением в нуль
4	1550	0,2	15	2	4	0,02	0,4	С возвращением в нуль
5	1300	0,3	10	2	5	0,02	0,4	С возвращением

								в нуль	
6	1550	0,3	10	2	4	0,02	0,4	С невозвращением в нуль	
7	1300	0,2	15	3	5	0,02	0,4	С возвращением в нуль	
8	1550	0,1	13	3	5	0,02	0,4	С невозвращением в нуль	
9	1300	0,1	15	2	5	0,02	0,4	С невозвращением в нуль	
10	1550	0,1	15	3	5	0,02	0,4	С возвращением в нуль	

№ варианта	$\lambda$ , нм	$\Delta \lambda$ , нм	$P_{\text{пер}}$ , мВт	$\alpha_{\text{вх}}$ , дБ	$\alpha_{\text{вых}}$ , дБ	$\alpha_{\text{нс}}$ , дБ	$\alpha_{\text{рс}}$ , дБ	Способ кодирования
11	1300	0,2	10	3	4	0,02	0,4	С невозвращением в нуль
12	1550	0,3	10	2	5	0,02	0,4	С невозвращением в нуль
13	1300	0,2	15	3	4	0,02	0,4	С возвращением в нуль
14	1550	0,2	15	2	3	0,02	0,4	С невозвращением в нуль
15	1300	0,2	13	2	3	0,02	0,4	С возвращением в нуль
16	1550	0,1	15	2	5	0,02	0,4	С возвращением в нуль
17	1300	0,2	12	3	4	0,02	0,4	С невозвращением в нуль
18	1550	0,2	13	3	4	0,02	0,4	С возвращением в нуль
19	1300	0,3	15	3	4	0,02	0,3	С возвращением в нуль