Оценка надежности оптического волокна на основе испытаний на кратковременную прочность и статическую усталость.

Мильков Александр Валерьевич, Яковлев Михаил Яковлевич (Техномаш-ВОС)

Аннотация: *Предложен модифицированный закон распределения Вейбулла, учитывающий влияние крупных и мелких дефектов на прочность оптического волокна. Предложена методика испытаний образцов оптического волокна заданной длины в специально сконструированных приспособлениях. Получены значения механических характеристик оптического волокна и на их базе выполнена оценка его долговечности.*

Библ.14, Ил.5, Стр.7

Введение

При эксплуатации оптических волокон, проблема долговечности приобретает решающее значение. Механические требования, предъявляемые к конструкции оптоволоконного кабеля, выполняются, если оптическое волокно прочно и не разрушается в течение заданного срока службы. Поэтому создание оптического кабеля связи на основе оптических волокон заданной долговечности требует анализа прочностных характеристик волокна, оценки кратковременной и длительной прочности волокна и оценки надежности оптического волокна.

Оценка кратковременной и длительной прочности оптического волокна исследовалась в работах[1-10]. При этом авторы уделяли внимание либо виду распределения механической прочности оптических волокон[5-8], либо предлагали методы определения длительной прочности[1-4, 10]. Вопросы надежности оптического волокна рассматривались в [9].

Однако, влияние конкретных механических характеристик на надежность оптического волокна, равно как и способы их получения описаны не были.

В настоящей работе была предложена методика оценки надежности оптического волокна на основе механических характеристик, полученных при испытаниях волокна на кратковременную и длительную прочность.

Надежность оптического волокна.

Основной характеристикой надежности оптического волокна может быть названа долговечность t волокна длиной L, находящегося под воздействием заданных эксплуатационных напряжений σ с вероятностью разрушения P.

Таким образом, долговечность может быть выражена как:

$$t = t(L, \sigma, P) \tag{1}$$

Для нашего случая целесообразно видоизменить (1) введением в формулу набора характеристик кратковременной и длительной прочности, полученных способом, изложенным ниже. Таким образом, формула (1) примет вид:

$$t = t(L, \sigma, P, \alpha_i) \tag{2}$$

где α_i - механические характеристики оптического волокна.

Определение длительной прочности оптического волокна

Долговечность оптического волокна определяется характером и скоростью распространения трещин в стекле [11]. Как было показано в [2-4], распространение трещин зависит от коэффициента концентрации напряжений K_I и от окружающей среды стекла под напряжением. Видерхорн [10] измерил скорость распространения трещин в зависимости от прилагаемой силы и коэффициента интенсивности напряжений при различном содержании воды в атмосфере. В результате проведенных испытаний ему удалось выявить стадии развития трещин в стекле. Интерпретация скоростей роста трещин при таком подходе может осуществляться с применением теории Чарлза и Хиллига[1]:

$$v = v_0 \exp\left[-\frac{E + \frac{b}{K_I}}{RT} \right] \quad (3)$$

где v - скорость роста трещины; b и v_0, - константы;

E - энергия активации;

R - универсальная газовая постоянная;

T - абсолютная температура;

K_I - коэффициент интенсивности напряжений.

Этот закон распространения трещин экспоненциального типа мало применим, при этом отдается предпочтение более простому в использовании эмпирическому приближению, хорошо описывающему скорость роста трещин [1]:

$$v = AK_I^n \quad (4)$$

где v - скорость роста трещины;

K_I - коэффициент интенсивности напряжений;

A и n - константы, зависящие от материала и окружающей среды.

Константа n является характеристикой усталости стекла для данной среды и носит название параметра усталости.

Задавшись зависимостью (4) скорости роста трещин от величины коэффициента интенсивности K_I, а, следовательно, от приложенного напряжения, можно определить время разрушения t_s [1]:

$$t_s = \frac{B\sigma_c^{n-2}}{\sigma^n} \quad (5)$$

где $B = \dfrac{2}{AY^2(n-2)K_{1C}^{n-2}}$

σ_c - прочность волокна в инертной среде;

σ - приложенное напряжение,

A - константа в выражении (4) для скорости роста трещины;

Y - коэффициент, зависящий от геометрии трещины и образца;

n - параметр усталости;

K_{IC} - коэффициент интенсивности, соответствующий инертной среде.

Следует заметить, что формула (5) получена при принятии следующих допущений:

- K_I < 0.7K_{IC}, или σ < 0.7σ_c, то есть действующее на волокно напряжение на 30% меньше предельного напряжения для инертной среды, что обычно выполняется ввиду снижения прочности стекла при воздействии окружающей среды,
- Параметр усталости n >10, что также подтверждается экспериментальными данными.

Прологарифмировав выражение (5), получим:

$$\ln t_s = -n \ln \sigma + \ln k_s \quad (6)$$

где t_s - время разрушения,

σ - приложенное напряжение,

k_s - константа, определяемая условиями окружающей среды.

Постоянные $\ln k_s$ и n могут быть получены методом регрессионного анализа из результатов опытов по определению времени разрушения образцов под напряжением σ в различных условиях окружающей среды.

Однако у данного метода есть один существенный недостаток: при небольших значениях напряжения σ, время до разрушения t_s может оказаться очень большим и, в связи с этим, проведение такого рода испытаний становится нецелесообразным.

Для исключения этого недостатка используются в основном динамические методы [1, 12]. В соответствии с одним из таких методов волокно подвергают напряжениям, возрастающим при различных скоростях, предполагающих несколько декад [1].

Действительно, если принять $\sigma = qt$, то после преобразований [1] можно получить, приняв q = const:

$$\sigma^{n+1} = B(n+1)\sigma_c^{n-2} q \tag{7}$$

Это уравнение сводится логарифмированием к уравнению:

$$\ln \sigma_d = (n+1)^{-1} \ln q + (n+1)^{-1} \ln k_d \tag{8}$$

Дальнейшие преобразования дают возможность выразить в явном виде время t_d при условии, что $\sigma_d = qt_d$ и получить запись, сходную по форме с (6):

$$\ln t_d = -n \ln \sigma_d + \ln k_d \tag{9}$$

где t_d - время разрушения,

σ_d - напряжение в конце нагружения,

k_d - константа, определяемая условиями окружающей среды.

Связь между k_d и k_s может быть представлена как:

$$\frac{k_d}{k_s} = n + 1 \tag{10}$$

Графическая интерпретация формулы (9) приведена на рис.1. Необходимо заметить, что данная кривая соответствует 50% вероятности разрушения, следующей из регрессионного анализа.

Статистическая оценка механической прочности. Распределение Вейбулла

Для статистической оценки кратковременной (механической) прочности оптического волокна предлагались различные типы распределений: Риттер и Джейкус [5] не дают гипотез на распределение, Доремус [6] предлагает логарифмически нормальное распределение. Однако, распределение Вейбулла очень практично в случае исследования вероятности излома хрупких материалов [7,8].

Использование закона Вейбулла предполагает распределение:

$$N(\sigma) = \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m, \tag{11}$$

где m и σ_0 - экспериментально определяемые параметры.

На основании (11), закон распределения Вейбулла обычно записывается в виде:

$$P(\sigma, L) = 1 - \exp\left[-L\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right] \tag{12}$$

При определении кратковременной прочности длинных оптических волокон возникает проблема, связанная с невозможностью их испытаний на существующей испытательной технике, а также сложность учета нагружения оптического волокна собственным весом. Действительно, практическое применение имеют оптоволоконные кабели, длина которых может составлять сотни и тысячи метров.

Распределение Вейбулла (12) обеспечивает экстраполяцию средней вероятности разрушения для образцов большой длины [1], в соответствии с законом:

$$\frac{\sigma_Д}{\sigma_К} = \left(\frac{L_К}{L_Д}\right)^{\frac{1}{m}} \tag{13}$$

где $\sigma_Д$ - прочность длинного образца,

$\sigma_К$ - прочность короткого образца,

$L_К$ - длина короткого образца,

$L_Д$ - длина длинного образца,

m - показатель Вейбулла.

Например, если m=4 , то средняя механическая прочность волокна длиной 10 км в десять раз ниже механической прочности, определенной на образцах длиной 1м.

Как видно из (13) закон распределения Вейбулла, записанный в форме (12) позволяет оценить только отношение напряжений в длинном и коротком волокнах. На практике же необходимо уметь получать конкретные (числовые) значения напряжений для оптического волокна произвольной длины.

В настоящей работе предложен закон Вейбулла, который был модифицирован введением коэффициента длины волокна L_0:

$$P(\sigma, L) = 1 - \exp\left\{-\frac{L}{L_0}\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right\}, \tag{14}$$

где $P(\sigma, L)$ - вероятность разрушения;

L - длина оптического волокна;

σ - предел прочности волокна;

L_0, σ_0, m - параметры распределения Вейбулла.

Физический смысл коэффициента L_0 - длина образцов оптического волокна при испытаниях.

Рассматриваемые реальные распределения часто являются бимодальными. Статистическая обработка осуществляется тем же способом с записью совокупного количества дефектов:

$$N(\sigma) = \left(\frac{\sigma}{\sigma_1}\right)^{m_1} + \left(\frac{\sigma}{\sigma_2}\right)^{m_2} \tag{15}$$

что ведет к возможности излома при напряжении меньше σ:

$$P(\sigma, L) = 1 - \exp\left[-L\left(\frac{\sigma}{\sigma_1}\right)^{m_1} - L\left(\frac{\sigma}{\sigma_2}\right)^{m_2}\right] \tag{16}$$

Из литературы известны результаты определения кратковременной прочности по одной из мод распределения, соответствующим распределению больших и малых дефектов соответственно. Так в [9, 13] параметр распределения Вейбулла m был определен для малых значений вероятности разрушения (крупных дефектов); в [12] авторы приводят результаты определения параметра m для больших вероятностей разрушения (малых дефектов). Значения m разнятся от 3-5 для крупных дефектов – до 20 – 30 для малых.

В нашем случае предложено использование закона распределения Вейбулла, учитывающего обе совокупности дефектов.

Закон распределения Вейбулла был принят бимодальным, то есть состоящим из двух независимых мод, каждая из которых описывается уравнением (14) со своими значениями параметров m_1, m_2 и σ_{01}, σ_{02}. Первая мода справедлива для вероятностей разрушения волокна: $0.05 \le P(\sigma, L) \le 1.00$, а вторая мода – для вероятностей: $0.00 \le P(\sigma, L) \le 0.05$. Значение 0,05 в качестве границы двух мод выбрано априорно:

$$P(\sigma, L) = \begin{cases} 1 - \exp\left[-\dfrac{L}{L_0} \left(\dfrac{\sigma}{\sigma_{01}} \right)^{m1} \right], 0.05 \le P(\sigma, L) < 1.00 \\ 1 - \exp\left[-\dfrac{L}{L_0} \left(\dfrac{\sigma}{\sigma_{02}} \right)^{m2} \right], 0.00 \le P(\sigma, L) < 0.05 \end{cases} \quad (17)$$

Графическая интерпретация выражения (17) представлена на рис.2.

Экспериментальное определение характеристик кратковременной и длительной прочности оптического волокна.

Для определения характеристик оптического волокна использовали испытания на растяжение.

В качестве образцов использовали оптическое волокно с рабочей длиной: L_0=120±10 мм. Зажим образцов осуществлялся в специально сконструированных захватах[14], исключающих проскальзывание и раздавливание закрепляемых концов оптического волокна, а также обеспечивающих осесимметричное приложение растягивающей нагрузки к образцу.

Испытание на растяжение производили при фиксированной скорости перемещения захватов испытательной машины с регистрацией разрушающей нагрузки и диаграммы деформирования. На основании полученных экспериментальных данных определяли деформацию разрушения и, с учетом заданной скорости перемещения захватов, вычисляли время до разрушения. Испытания проводились при трех различных скоростях перемещения захватов, отличающихся на порядок: 0.57 мм/мин, 5.31 мм/мин, 55.1 мм/мин. При этом времена до разрушения, соответствующие заданным скоростям, также отличались на порядок.

Для определения характеристик кратковременной прочности, производили статистическую обработку по формуле (17) экспериментальных значений разрушающих напряжений, полученных при испытаниях со скоростью перемещения захватов, равной 5.31 мм/мин.

Полученные значения характеристик кратковременной прочности сведены в таблице 1.

Таблица 1.

m_1	σ_{01}	m_2	σ_{02}	L_0
28.604	5.587	5,187	5,222	Принято равным 120 мм

Для определения характеристик длительной прочности по формуле (9) методом регрессионного анализа были найдены значения n и $\ln(k_d)$, а по формуле (10) вычислено значение $\ln(k_s)$. Значения характеристик длительной прочности сведены в таблице 2.

Таблица 2.

n	$\ln(k_d)$
23,287	42.189

Оценка долговечности оптического волокна

Вывод формулы для оценка долговечности был осуществлен на основании выражения (2), в котором длина L, напряжения σ и вероятность разрушения P оптического волокна являются варьируемыми величинами, а характеристики оптического волокна α_i - известными величинами, приведенными в таблицах 1 и 2.

Полученная в результате определения длительной прочности оптического волокна кривая, представленная на рис.1., с учетом выражения (10) преобразуется в кривую длительной прочности оптического волокна длиной L_0 с 50% вероятностью разрушения. Графическая интерпретация полученной кривой приведена на рис.3.

Для получения кривой длительной прочности волокна с вероятностью разрушения, отличной от 50%, необходимо осуществить параллельный перенос кривой на величину $\Delta \ln(\sigma)$, как показано на рис.4.

Величина $\Delta \ln(\sigma)$ определяется из распределения Вейбулла следующим образом (см. рис.5.)

Для первой моды распределения, соответствующей вероятности разрушения $0.05 \le P(\sigma, L) \le 1.00$, на основании выражения (17) может быть получено:

$$m_1 \ln(\sigma_{01}) = m_1 \ln(\sigma_1^{50}) - \ln\left(\frac{L_0}{L}\ln 2\right) \tag{18}$$

где σ_1^{50} - напряжение, соответствующее 50% вероятности разрушения по первой моде.

Тогда, $\Delta\ln(\sigma)$ определяется как разность $\ln(\sigma)$ и $\ln(\sigma_1^{50})$ и с использованием выражения (18) и после некоторых преобразований может быть записано в виде:

$$\Delta\ln(\sigma) = \frac{1}{m_1}\left(\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-P}\right)\right) - \ln(\ln 2)\right) \tag{19}$$

Для второй моды распределения, соответствующей вероятности разрушения волокна $0.00 \le P(\sigma, L) \le 0.05$, величина $\Delta\ln(\sigma)$ может быть получена из рассмотрения треугольника ABC (см. рис.5).

Заметим, что $P_A = P_B = 0.5$, найдем P_C из условия $AC = AB \cdot m_2$, используя выражение (19):

$$\ln\left(\frac{L_0}{L}\ln 2\right) - \ln\left(\frac{L_0}{L}\ln\left(\frac{1}{1-P_c}\right)\right) = m_2\left(\ln(\sigma_2^{50}) - \ln(\sigma_1^{50})\right) \tag{20}$$

где σ_1^{50} и σ_2^{50} - напряжения, соответствующие 50% вероятности разрушения по первой и второй моде соответственно.

Выразив σ_1^{50} и σ_2^{50} через σ_{01} и σ_{02} в соответствии с (18) и подставив получившиеся значения в (20), после преобразований получим:

$$\ln\left(\frac{L_0}{L}\ln\left(\frac{1}{1-P_c}\right)\right) = m_2\left(\ln(\sigma_{01}) - \ln(\sigma_{02})\right) + \frac{m_2}{m_1}\ln\left(\frac{L_0}{L}\ln 2\right) \tag{21}$$

Окончательно, $\Delta\ln(\sigma)$ определяется, как разность $\ln(\sigma)$ и $\ln(\sigma_2^{P_c})$ и после некоторых преобразований может быть записано в виде:

$$\Delta\ln(\sigma) = \left(\ln(\sigma_{02}) - \ln(\sigma_{01})\right) + \frac{1}{m_2}\ln\left(\frac{L_0}{L}\ln\left(\frac{1}{1-P}\right)\right) - \frac{1}{m_1}\ln\left(\frac{L_0}{L}\ln 2\right) \tag{22}$$

Таким образом, с учетом вышесказанного, уравнение длительной прочности (9) может быть преобразовано к следующему виду:

$$\ln(t) = -n\left(\ln(\sigma) - \Delta\ln(\sigma)\right) + \ln\left(\frac{k_d}{n+1}\right) \tag{23}$$

Следует заметить, что уравнение (23) справедливо только для волокна длиной L_0. Для того, чтобы распространить его на случай произвольной длины волокна, необходимо на основании выражения (19) учесть зависимость напряжения в волокне от его длины.

Выражение (23) примет вид:

$$\ln(t) = -n\left(\ln(\sigma) + \frac{1}{m_1}\ln\left(\frac{L_0}{L}\right) - \Delta\ln(\sigma)\right) + \ln\left(\frac{k_d}{n+1}\right) \tag{24}$$

где $\Delta\ln(\sigma) = \frac{1}{m_1}\left(\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-P}\right)\right) - \ln(\ln 2)\right)$, $0.05 \le P(\sigma, L) \le 1.00$;

$$\Delta \ln(\sigma) = \left(\ln(\sigma_{02}) - \ln(\sigma_{01})\right) + \frac{1}{m_2}\ln\left(\frac{L_0}{L}\ln\left(\frac{1}{1-P}\right)\right) - \frac{1}{m_1}\ln\left(\frac{L_0}{L}\ln 2\right),\ 0.00 \le P(\sigma, L) \le 0.05$$

Выражение (24) имеет вид уравнения (18) и позволяет рассчитать долговечность оптического волокна длиной L, находящегося под воздействием заданных эксплуатационных напряжений σ с вероятностью разрушения P.

Особо следует отметить, при определении долговечности оптического волокна с использованием выражения (24) для вероятности разрушения $0.05 \le P(\sigma, L) \le 1.00$, требуется меньшее число исходных экспериментальных данных, чем для вероятности разрушения $0.00 \le P(\sigma, L) \le 0.05$ и для определения долговечности волокна для вероятности разрушения $0.05 \le P(\sigma, L) \le 1.00$ можно использовать одномодальное распределение Вейбулла, что значительно сокращает объем испытаний.

Пример расчета долговечности оптического волокна

Для расчета долговечности оптического волокна длиной L =1 км, находящегося в обычных климатических условиях под воздействием эксплуатационных напряжений σ =0,30ГПа (усилие=3.7Н) с заданной вероятностью разрушения P =3%, воспользуемся формулой (24). Значения параметров распределения Вейбулла и параметров длительной прочности принимаем равными приведенным в таблицах 1 и 2 соответственно. Результаты расчета долговечности волокна по первой и второй модах приведены в таблице 3.

Таблица 3

Долговечность, годы	По первой моде	По двум модам
	4,48E+23	2,00

Видна абсурдность расчета с использованием одномодального закона распределения Вейбулла – стекло в свободном состоянии за такой период времени распадется физически или закристаллизуется без приложения напряжений.

Величина долговечности, рассчитанная с использованием предложенного бимодального распределения Вейбулла, позволяет составить прогноз долговечности оптического волокна, находящегося под воздействием заданных эксплуатационных напряжений и хорошо согласуется с экспериментальными данными[9].

Список литературы

1. Гомберт Ж., Бейлак К и др. Механическая прочность оптических волокон.- пер. Gombert J., Baylac C., Blaison S., Quinty C. Et al. - Resistance mecanique des fibres optiques, Thomson-CSF - Revue technique, 1985, vol.17, №4, pp. 343-376
2. G.R. Irwin, J. Appl. Mech., Vol.24, 1957, p.361.
3. M.L. Williams, J. Appl. Mech., Vol.24, 1957, p.109.
4. J.P. Jaguin et A. Zaganiaris, Verres et Refract. Vol.34, (4), 1980, p.469.
5. J.E. Ritter, K. Jakus, J. Mater. Sc., vol.16, 1981, p.1909.
6. H. Doremus, Failure Prediction in Glass, US Army Research Office, Contract DAAG 2980C0140, 1981.
7. K. Trustrum, A. Des. Jayatilaka, J. Mater. Sc. Vol.18, 1983, p.2765.
8. W.E. Snowden, Fracture Mechanics of Ceramics, Vol.3, R.C. Bradt ed., Plenum Press, New-York, 1978, p.143.
9. Руководящий материал РМ В 22.24.104-87. Методы оценки соответствия требованиям по надежности оптических кабелей. 1987 г.
10. S.M. Weiderhorn J.Amer. Cer. Soc., vol.50, 1967, p.407.
11. Байкова Л.Г., Песина Т.И., Пух В.П., Давидович Н.М., Радеева Е.Н., Снижение прочности оптических кварцевых волокон при удалении полимерного покрытия – Физика и химия стекла, Том. 18, №2, 1992.
12. Татикура М. Теоретический анализ прочности оптических волокон по результатам испытаний на изгиб. Пер. 1990 г.
13. Typical Fujikura’s Fiber Data – Proceedings Optical Fiber Products Div. 1995.
14. Подана заявка №2001114422/28 от 30.05.01 на изобретение (Устройство для испытания световодов на разрыв)

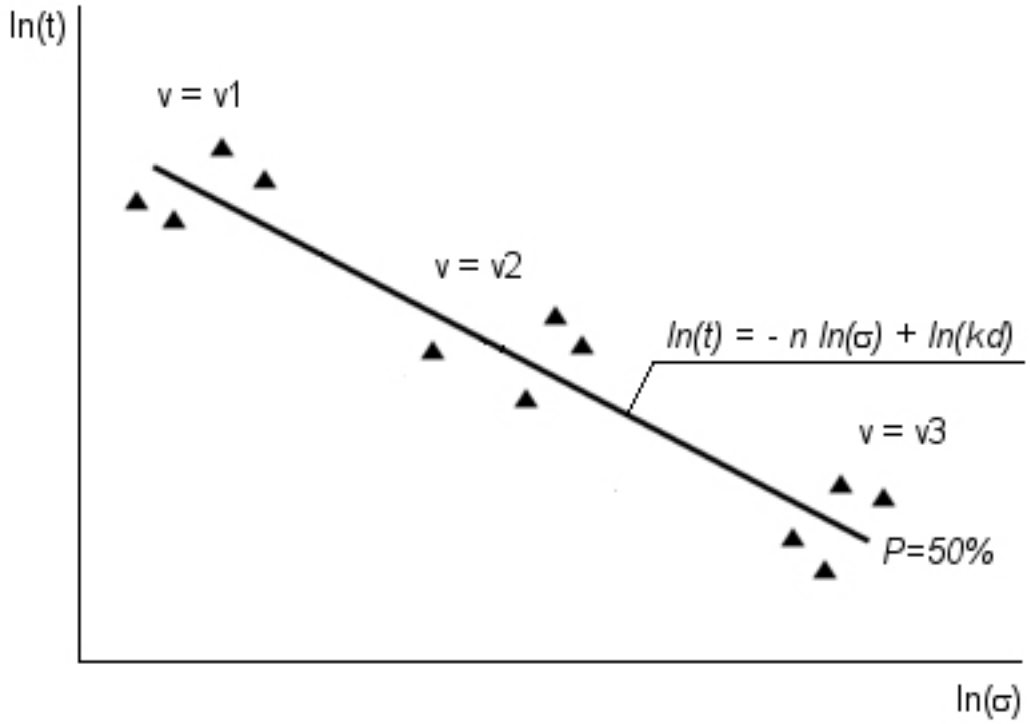

Рис.1. Кривая длительной прочности оптического волокна.

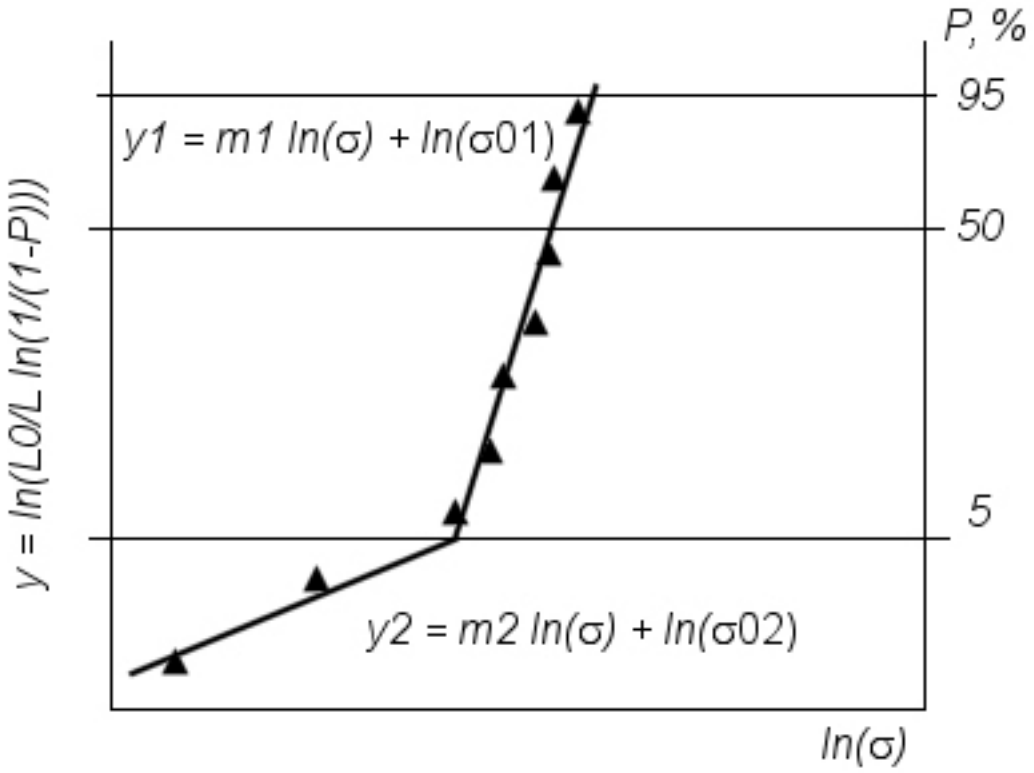

Рис. 2. Бимодальное распределение прочности оптического волокна (распределение Вейбулла)

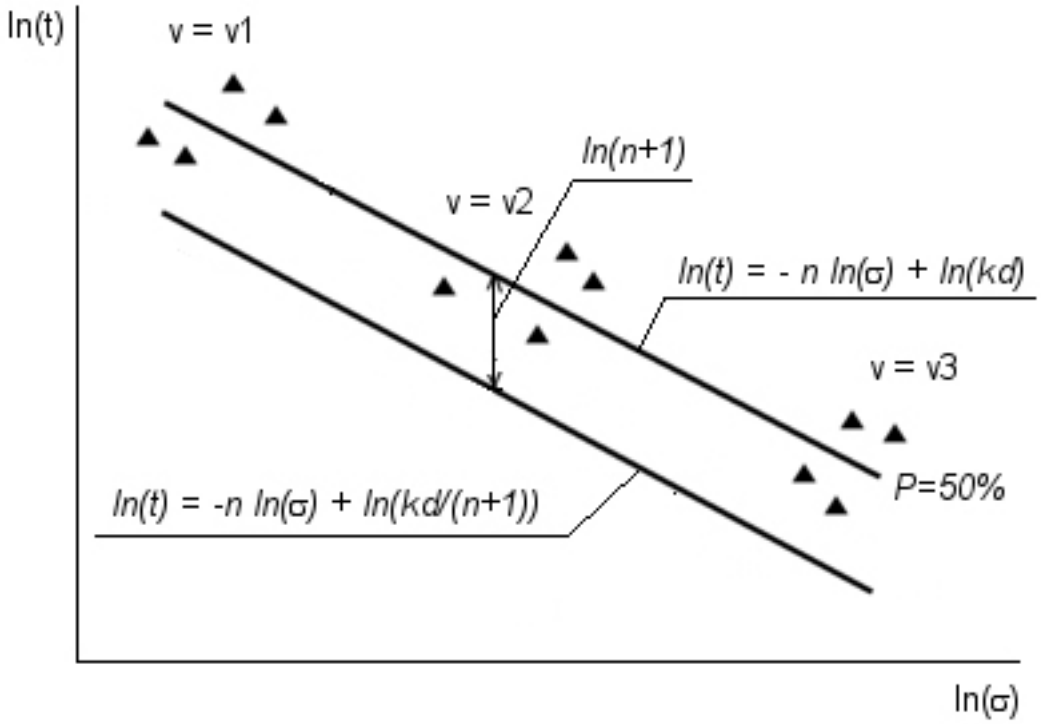

Рис.3. К выводу основной формулы расчета долговечности.

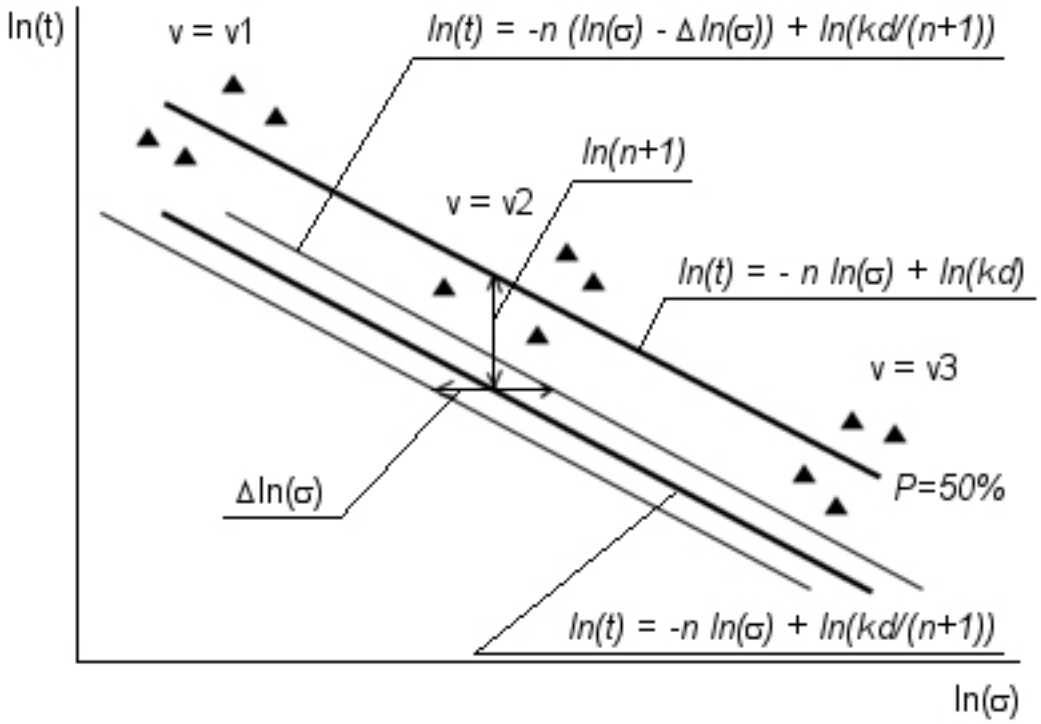

Рис.4. К выводу основной формулы расчета долговечности.

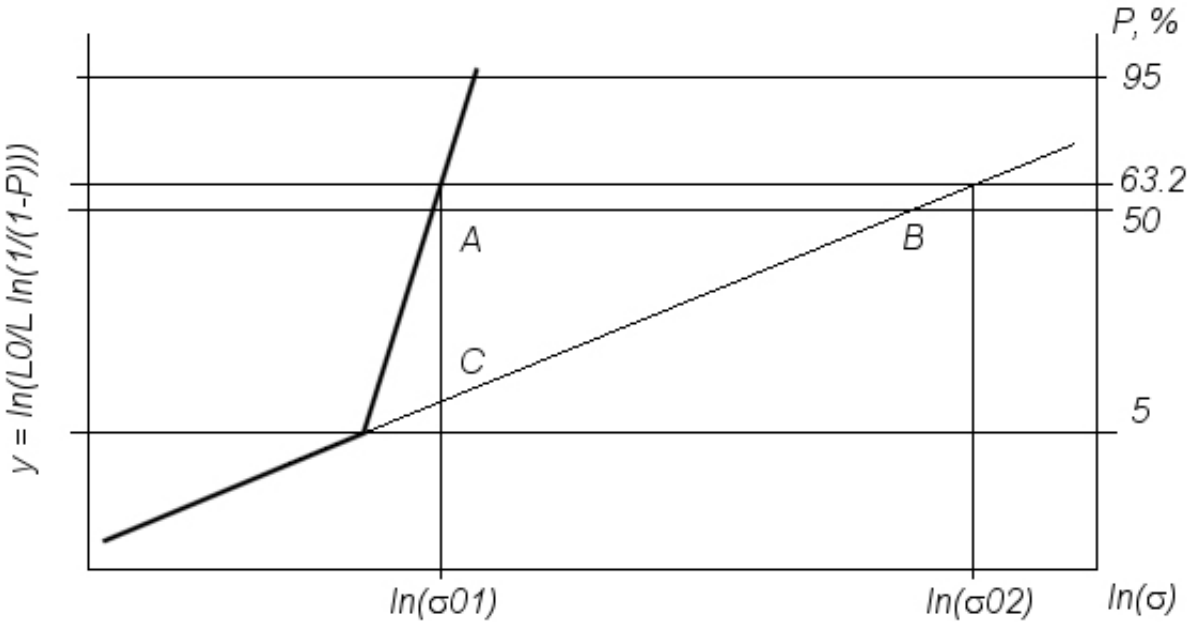

Рис.5. К выводу основной формулы расчета долговечности.