

Приближенная оценка физической надежности различных элементов на основе закона Больцмана

Л.А. Латышев

Аннотация

Вопросы надежности становятся все более важными при создании и эксплуатации современных изделий, поэтому растет поток информации, которая помогает определить отдельные аспекты надежности изделий самой разной сложности: от элементов до больших систем. Это и новые научно-математические подходы, и инженерно-технические способы, и анализ всего статистического и логического материала и многое другое. Однако по-прежнему остается острой проблема повышения надежности разнообразных элементов, из тысяч и тысяч которых создаются реальные конструкции. Проведено большое количество теоретических, расчетных и экспериментальных работ, которые обобщены, например, в [1, 2], но до настоящего времени нет достаточно достоверных и удобных методов оценки надежности элементов, особенно при изменении их собственных параметров и условия работы. В большинстве случаев при таких оценках применяют либо эмпирические коэффициенты для простых линейных зависимостей, либо используют результаты многочисленных и трудоемких экспериментальных исследований.

Ключевые слова

расчет надежности; статистический ансамбль; закон Больцмана; вероятность отказа

В связи с ускорением научно-технического прогресса моральное старение современных устройств тоже происходит очень быстро, а требования к надежности возрастают. Все это усиливает противоречие между сокращением сроков на создание и доводку изделия и временем, необходимым для его тщательной отработки. Особенно остро такие противоречия встают при проектировании авиационных и космических изделий, сроки

создания которых соизмеримы с продолжительностью их эксплуатации, а ресурсы должны быть значительно больше, так как нужна высокая надежность.

Одним из возможных выходов из этой сложной ситуации является разработка методов приближенного расчета надежности изделий в различных условиях эксплуатации.

С этой целью можно воспользоваться представлением элемента как статистического ансамбля, в котором распределение отдельных частиц (атомов, молекул, кластеров, кристаллов, дислокаций и т.п.) соответствует закону Больцмана, записанному в виде:

$$\psi = \psi_0 \exp\left(-\delta \frac{J}{A}\right), \quad (1)$$

здесь:

ψ - прочность или другой аналогичный параметр;

ψ_0 - прочность при нормальных условиях;

J - величина, пропорциональная энергии связи между частицами элемента;

A - величина, пропорциональная энергии внешнего разрушающего воздействия;

δ - оператор вариации параметров.

В частном случае при изменении температуры от T_0 до T_1 для одного и того же материала

$$\exp\left(-\delta \frac{J}{A}\right) = \exp\left(-B \frac{T_1 - T_0}{T_1}\right), \quad (2)$$

где:

B - поправочный множитель, который будет определен в дальнейшем.

При оценке вероятности отказа Q часто используют следующее соотношение [3]:

$$Q = 0.5 - \Phi\left(\frac{1 - \bar{\psi}}{\sqrt{2\bar{\sigma}}}\right), \quad (3)$$

где

$$\bar{\psi} = \frac{\psi_H}{\psi_{PP}};$$

ψ_H - внешнее воздействие на элемент (нагрузка);

ψ_{PP} - стойкость элемента к внешнему воздействию (прочность);

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\bar{\sigma}_H^2 + \bar{\sigma}_{PP}^2};$$

$\bar{\sigma}_i = \frac{\sigma_i}{\psi_i}$ - относительное среднестатистическое отклонение параметра i .

Изменение внешних условий приводит к изменению ψ_H и $\psi_{пр}$. В частности, $\psi_{пр}$ связано с выбранным материалом. При росте температуры элемента может уменьшаться прочность, причем нагрузка может не быть постоянной. Таким образом, с помощью выражения (3) удастся найти изменение Q в зависимости от вариации разных параметров для любого закона надежности.

При использовании высоконадежных изделий вероятность отказа удобно представить в следующем виде:

$$Q = \lambda \tau, \quad (4)$$

где

λ - интенсивность отказов;

τ - время.

Оказалось, что совместное решение уравнений (2), (3) и (4) позволяет с достаточной точностью вычислять влияние на интенсивность отказов различных факторов, в том числе и температуры. При этом необходимо учитывать, что величина B , являющаяся поправочным коэффициентом, должна быть определена из рисунка 1, построенного на основании широко известного эмпирического закона Аррениуса, согласно которому интенсивность отказов λ удваивается при изменении температуры на 10°C (для комнатных условий).

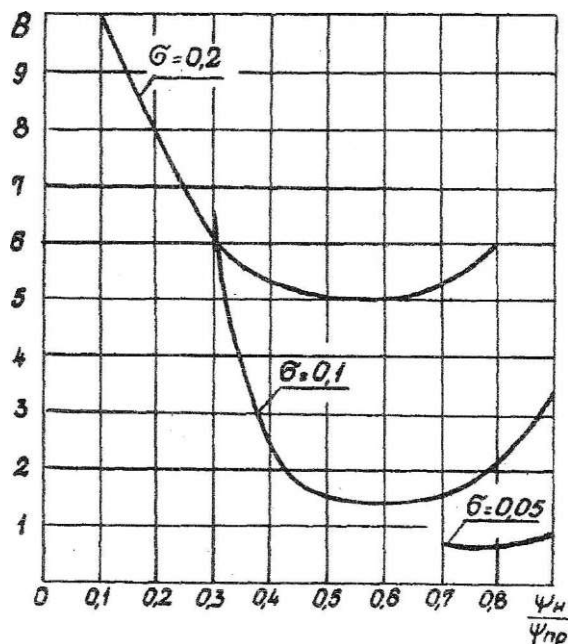


Рис.1. Зависимость поправочного коэффициента B от относительной нагрузки $\frac{\psi_H}{\psi_{пр}}$ и ошибки σ

Рассмотрим для примера, как можно рассчитать влияние температуры на длительную прочность стали 1Х18Н9Т. Соответствующие экспериментальные данные приведены на

рисунке 2 [4]. Поскольку сравнение для различных температур надо вести при одной и той же нагрузке, было принято, что $\psi_H = 1 \text{ кг/мм}^2$, тогда почти для всех температур (кроме 850 °С) $\psi < 0.3$. Из анализа различных экспериментальных данных можно определить, что $\bar{\sigma} \cong 0.1$.

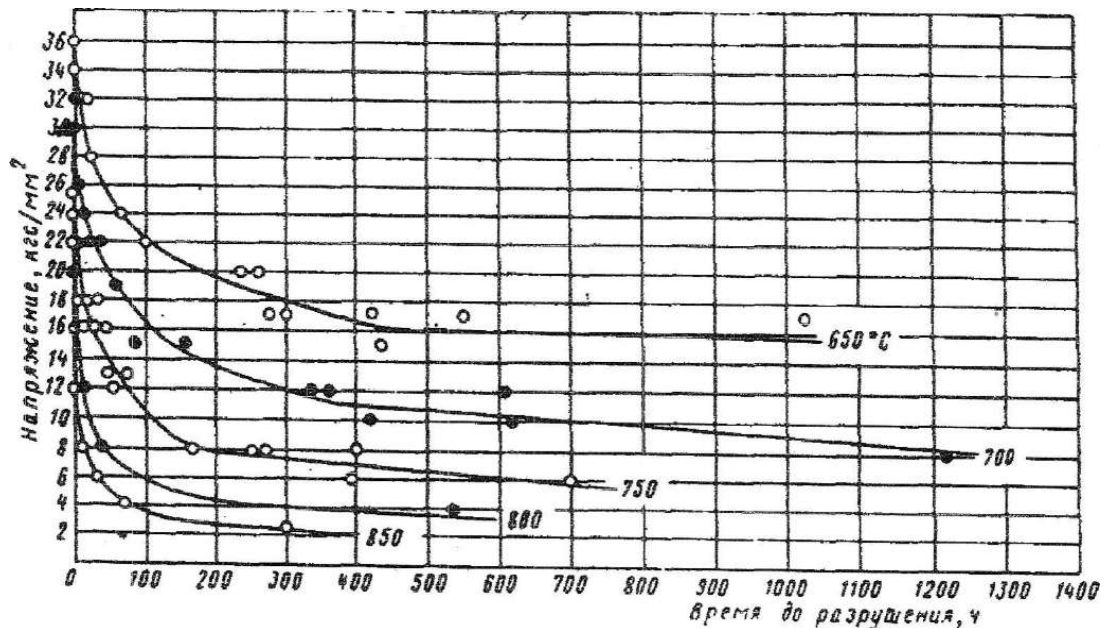


Рис.2. Влияние времени нагружения на прочность различных материалов лопаток турбин

В этом случае в соответствии с кривыми рисунка 1 можно принять $B = 9$. Вычисления по формуле (1) с учетом выражения (2) показали, что расчетные ψ_p и экспериментальные $\psi_{\text{э}}$ значения удовлетворительно согласуются между собой. В таблице 1 приведена величина их отношения $\psi_{\text{от}} = \frac{\psi_p}{\psi_{\text{э}}}$ в зависимости от температуры и длительности испытаний (100 часов и 400 часов). Из этой таблицы видно, что ошибка равномерно распределяется по всему интервалу и $\psi_{\text{от}} \cong 1$.

Таблица 1

Влияние температуры и времени эксплуатации лопаток турбин на отношение расчетного к экспериментальному значению напряжений

Температура, °C	650	700	750	800	850
Время, часов					
100	1	0.87	0.9	1.08	1.26
400	1	0.94	0.87	1.26	1.65

Рассуждения подобного типа позволяют оценивать не только прочность, но и интенсивности отказов.

Были выполнены расчеты относительной интенсивности отказов $K_p = \frac{\lambda_i}{\lambda_0}$ бумажных конденсаторов, и эти данные сопоставлены с достоверными сведениями, приведенными в [1].

Вычисления проводились для коэффициента нагрузки $\psi = K_H = 0.8$ (соответственно, $B = 1$) при $t = 20$ °С и предположении об экспоненциальном законе надежности. В этих расчетах при определении K_p по рисунку из [1, стр. 102] учитывалась поправка на изменение K_H в зависимости от температуры.

Результаты расчетов $\bar{K}_p = \frac{K_{pt}}{K_{p20^0}}$ по данной методике приведены на рисунке 3. Видно,

что предложенный способ дает вполне приемлемые результаты.

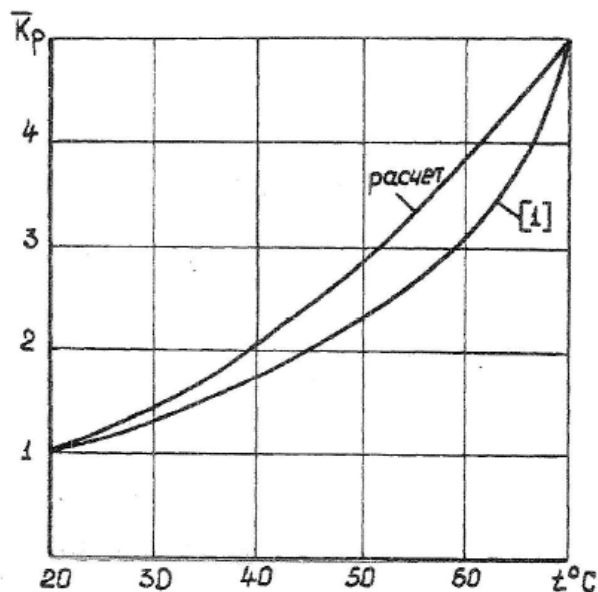


Рис.3. Результаты определения коэффициента \bar{K}_p для расчетных и экспериментальных значений температур

В ряде случаев приходится определять ресурсы работы элемента в зависимости от его нагрузки. Так, например, для ламп накаливания было учтено влияние разрушающего фактора A - напряжения питания U - на ресурс их работы. Подставляя U вместо A в уравнение (1), получим выражение:

$$\psi = \psi_0 \exp\left[-B\left(1 - \frac{1}{\bar{U}}\right)\right], \quad (5)$$

где:

$$\bar{U} = \frac{U}{U_0};$$

U_0 - номинальное напряжение, при котором ресурс составляет 10^3 часов.

Принимая различные значения B и $\bar{\sigma}$, можно построить зависимость ресурса (или, соответственно, λ) от этих величин (см. рисунок 4) и нанести на этот же рисунок

экспериментальные данные [5]. Из сравнения расчетных и опытных величин видно, что наилучшая сходимость получается, как и у бумажных конденсаторов, при $B = 1$ и $\bar{\sigma} = 0.1$.

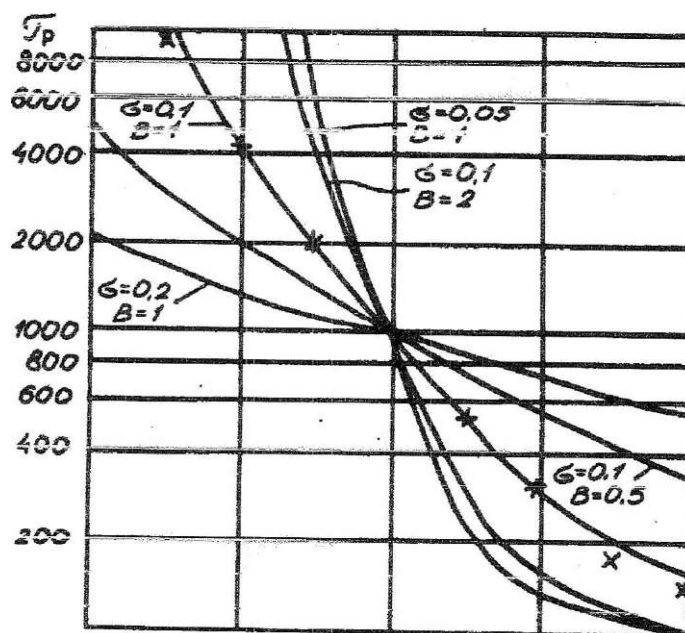


Рис.4. Влияние различных факторов на ресурс ламп накаливания

Это свидетельствует о том, что в обоих случаях $\bar{\psi}$ лежит в пределах от 0.5 до 0.7, наиболее характерных для большинства современных конструкций.

Таким образом, рассмотренные примеры показывают, что применение статистических представлений Больцмана для оценки физической надежности не только возможно, но и позволит быстро получать приближенные значения необходимых величин.

Библиографический список

1. Надежность и эффективность в технике. Т. 4. Методы подобия в надежности / Под ред. В.А. Мельникова и Н.А. Северцева - М.: Машиностроение, 1987.
2. Труха но в В.М. Надежность в технике - М.: Машиностроение, 1999.
3. Гуров А.Ф., Севрук Д.Д., Сурнов Д.Н. Конструкция и проектирование двигательных установок. 2 изд. - М.: Машиностроение, 1980.
4. Паршин А.М. Структура, прочность и пластичность нержавеющей и жаропрочных сталей. - Л.: Судостроение, 1972.
5. Вугман С. Сколько служит лампочка? - «Наука и жизнь», 1987, № 3, с. 120-121.

Информация об авторе

ЛАТЫШЕВ Леонид Алексеевич, профессор Московского авиационного института (национального технического университета), д.т.н.

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;
тел.: +74991580008