

## Остаточный ресурс эксплуатируемого объекта

### **ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ОСНОВНОГО КОРПУСА Р-1 ОАО «ВОЛТАЙР-ПРОМ» КАК СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ**

К.Н. СУХИНА, *старший преподаватель кафедры СКО и НС*  
В.А. ПШЕНИЧКИНА, *д.т.н., профессор, зав. кафедры СКО и НС*  
ФГБОУ ВПО "Волгоградский Государственный Архитектурно-Строительный  
Университет";  
400087, Волгоград, ул. Двинская, д.11«а», кв.75, [zhukova\\_kseniya@mail.ru](mailto:zhukova_kseniya@mail.ru)

*В статье была предложена методика определения закона изменения ресурса и прогнозирования срока службы эксплуатируемого здания, была смоделирована схема основных несущих конструкций покрытия в виде сложной резервированной системы с постоянно включенным резервом, приведены результаты определения основных числовых характеристик надежности и получено среднее время безотказной работы системы «подстропильная ферма - стропильная ферма».*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** остаточный ресурс; подстропильные фермы; числовые характеристики надежности; резервированные системы; среднее время безотказной работы.

Значительное увеличение межремонтных сроков зданий и сооружений промышленных предприятий, отсутствие достаточных объемов инвестиций в промышленность, привели к катастрофическому старению основных фондов промышленных предприятий и резкому снижению ресурса несущих строительных конструкций зданий и сооружений.

Указанные обстоятельства ставят перед балансодержателями предприятий целый спектр задач по оптимизации процесса эксплуатации, изыскания резервов эксплуатационной пригодности основных строительных конструкций зданий и сооружений и продления их срока.

Эти задачи легко решаемы при правильной и достоверной оценке остаточного ресурса эксплуатируемого объекта. Оценка ресурса производится вероятностными методами [2] и является достаточно сложным процессом, требующем большого количества исходных данных, длительного наблюдения за эксплуатируемым объектом, регулярным проведением технического освидетельствования основных несущих конструкций (на протяжении не менее 15-20 лет) [8]. Чтобы дать достоверную оценку надежности и долговечности необходимо, в первую очередь, знать закон снижения остаточного ресурса.

Как правило, при проведении обследования конструкций зданий и сооружений и прогноза о сроке дальнейшей эксплуатации функция снижения работоспособности остается неопределимой и, в лучшем случае, может быть аппроксимирована линейной зависимостью по двум точкам (соответствующим состоянию конструкций на момент текущего и ранее проведенного обследования). Это дает достаточно грубую оценку ресурса с большой погрешностью. Для более точного определения закона изменения ресурса и прогнозируемого срока службы эксплуатируемого здания необходимо иметь данные как минимум трех обследований. При этом наиболее целесообразно за начальный момент времени принимать начало ввода в эксплуатацию объекта. Отсюда следует, что первое обследование должно проводиться в момент сдачи объекта, что современными нормами не предусмотрено. ГОСТ 31937-2011 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния» гласит, что первое сплошное обследование необходимо проводить через два года после ввода объекта в эксплуатацию. Таким образом, при оценке остаточного ресурса за начальный момент времени принимается значение

теоретического ресурса, а не фактического, что не является верным, т.к. при оценке риска мы получим значения на один-два порядка выше.

Еще одним важным фактором оценки ресурса является правильный выбор схемы соединения несущих конструкций в сложную систему [5]. Очень часто общую оценку остаточного ресурса дают по результатам наиболее нагруженного или поврежденного элемента, что дает ошибочное представление о сроке службы всего здания.

Любой эксплуатируемый объект необходимо рассматривать как сложную систему, элементами которой будут являться несущие конструкции.

Надежность сложной системы определяется путем вычисления сначала вероятности безотказной работы каждого звена (при последовательно- параллельном соединении) или каждой цепи (при параллельно- последовательном соединении), а затем получают вероятность не разрушения всей системы.

Несущие конструкции зданий и сооружений могут быть представлены в виде систем общего (рис. 1) или раздельного резервирования (рис. 2).

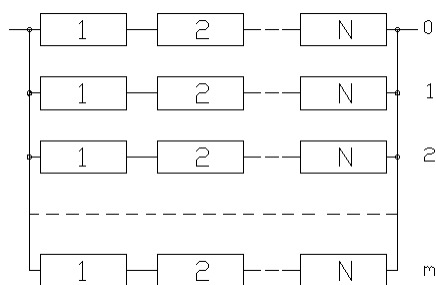


Рис. 1. Схема общего резервирования

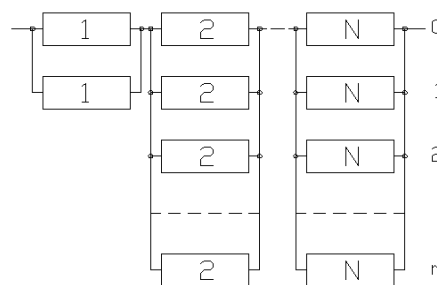


Рис. 2. Схема раздельного резервирования с постоянно включенным резервом

При общем резервировании при отказе одного элемента наступает отказ всей системы, а при раздельном или поэлементном резервировании при отказе элемента наступает отказ одной резервной группы (одного резервного соединения) [3].

При моделировании объекта в виде сложной резервированной системы следует учитывать, что она может быть описана в виде системы с постоянно включенным резервом или с замещением. При постоянно включенном резерве все элементы системы работают в одном режиме. Наступление отказа одного из элементов в такой системе может способствовать нарушению нормальной работы других элементов системы. В резервированных системах с замещением резервные элементы находятся в состоянии покоя и включаются в работу только при отказе основного элемента [6,7].

В настоящее время достоверность показателей надежности и результатов оценки остаточного ресурса эксплуатируемого объекта напрямую зависят от компетенции экспертов. Предложенный выше метод по оценке остаточного ресурса позволяет исключить человеческий фактор и уровень оснащенности лабораторной базы при проведении технического освидетельствования конструкций исследуемого объекта.

В качестве примера использования моделей резервирования и определения закона снижения функции работоспособности строительных конструкций были рассмотрены несущие конструкции покрытия основного корпуса Р-1 ОАО «ВОЛТАЙР-ПРОМ».

На первом этапе определялся закон снижения остаточного ресурса. Наблюдения за конструкциями проводились в течение 41 года. Первое обследование было проведено при вводе здания в эксплуатацию в 1964 году,

последующие – в 1989 г., 1997 г., 2005г. При каждом обследовании оценивалась фактическая несущая способность конструкций и вычислялся индекс надежности. Получен эмпирический закон снижения характеристики безопасности от времени  $\beta(t)$  (кривая 1 на рис. 3), который был аппроксимирован кубической параболой [1]. На графике видно, что к 41 году ресурс основных конструкций и всего здания в целом приближается к критическому значению:  $\beta(T = 41) = 2,02$ . Назначенный ресурс составлял  $\beta(T = 0) = 5,2$ . Точка 4 на рис.3 соответствует теоретической несущей способности рассматриваемой системы.

Анализ графиков приведенных на рис.3, наглядно показывает, что оценить ресурс конструкций  $T_{res}(\beta, T)$  и составить прогноз о времени их последующей безопасной эксплуатации по результатам 1-2-х обследований не представляется возможным. Так, получив значения  $\beta(T = 25)$  и  $\beta(T = 33)$  и приняв линейную модель скорости изменения функции  $\beta(T)$  получим, что ее прогнозное значение к 41 году эксплуатации (линия 2 рис. 3) существенно расхожиться с фактическим.

Для получения адекватной оценки скорости износа конструкций чрезвычайно важно знать уровень надежности, реализованный при его возведении  $\beta(T = 0)$ . Использовать детерминированное расчетное значение несущей способности, как это часто принимается в инженерной практике, в задаче оценки остаточного ресурса некорректно (рис.3, кривая 3).

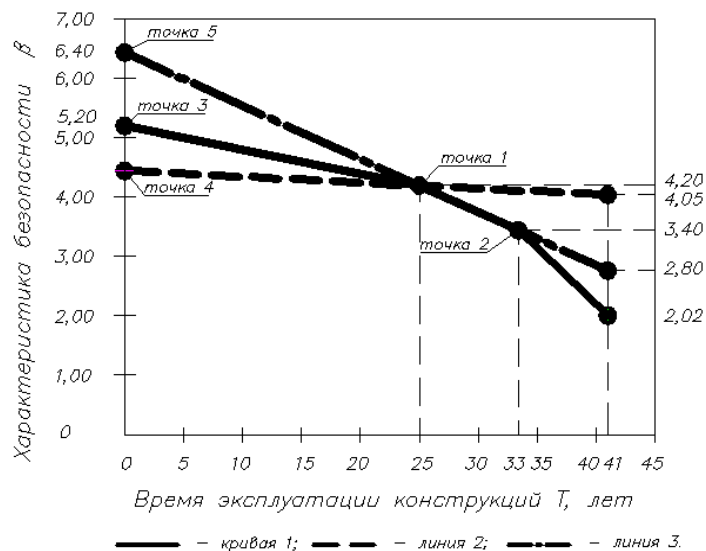


Рис. 3 Графики снижения характеристики безопасности  $\beta(t)$  от времени T

Вторым этапом задавалась схема соединения подстропильных и стропильных ферм в сложную систему.

В зависимости от расположения стропильных ферм покрытия в плане корпуса Р-1 эти конструкции были разбиты на 7 типов (с учетом требований СНИП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия»). Каждый тип в свою очередь был разбит еще на 3 категории эксплуатационного состояния (1 категория – снижение проектного расчетного сопротивления на 0%, 2 категория – на 6%, 3 категория – на 12%). Затем каждый из этих 21 вариантов, согласно чертежам, был рассчитан на заданные 4 схемы технологической узловой нагрузки. Схема расположения стропильных ферм по типам представлена на рис. 4.

Подстропильные фермы корпуса Р-1 были рассмотрены в [1]. Основываясь на теорию надежности можно сделать вывод что подсистемы «подстропильная

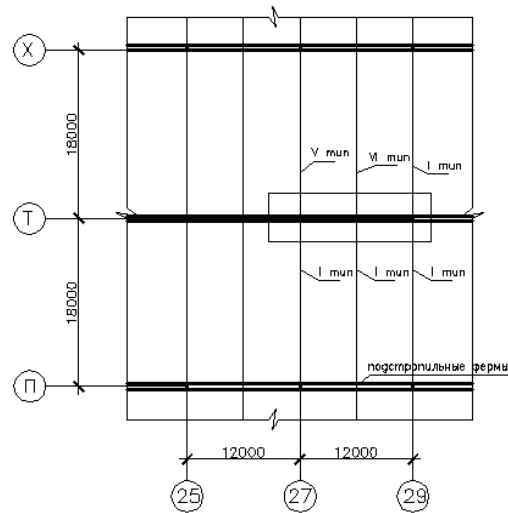


Рис. 4 Схема расположения стропильных и подстропильных ферм в зависимости от типа

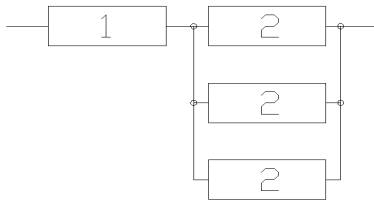


Рис. 5 Схема резервирования стропильных и подстропильных ферм

ферма» – «стропильная ферма» соединены между собой последовательно. С учетом разделения стропильных ферм на типы мы получаем систему резервирования с числом элементов  $N = 2$  и кратностью резервирования  $m = 2$  (рис. 5).

Таким образом, была использована схема раздельного (поэлементного) резервирования с постоянно включенным резервом.

Основные количественные характеристики при поэлементном резервировании с постоянно включенным резервом будут определяться следующим образом [4]:

- вероятность безотказной работы системы в течении времени  $t$  равна произведению вероятностей ее элементов

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^N P_i(t) = \prod_{i=1}^N \left\{ 1 - \prod_{i=0}^m [1 - p_i(t)] \right\}, \quad (1)$$

где  $N$  – число элементов системы;  $m$  – кратность резервирования;  $p_i(t)$  – вероятность безотказной работы  $i$ -ого элемента:

$$p_i(t) = e^{-\lambda_i t}, \quad (2)$$

- частота отказов:

$$a_c(t) = -P'_c(t) = N(m+1)\lambda e^{-\lambda t} (1 - e^{-\lambda t})^m [1 - (1 - e^{-\lambda t})^{m+1}]^{N-1}, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – среднее значение интенсивности отказа  $i$ -ого элемента:

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i}{N}, \quad (4)$$

интенсивность отказов:

$$\lambda_c(t) = \frac{a_c(t)}{P_c(t)} = \frac{N(m+1)\lambda e^{-\lambda t} (1 - e^{-\lambda t})^m}{1 - (1 - e^{-\lambda t})^{m+1}}, \quad (5)$$

среднее время безотказной работы:

$$T_c = \int_0^{\infty} P_c(t) dt, \quad (6)$$

$$\text{или } T_c = \frac{(N-1)!}{\lambda \cdot (m+1)} \cdot \sum_{j=0}^m \frac{1}{\frac{j+1}{m+1} \cdot \left(\frac{j+1}{m+1} + 1\right) \cdot \left(\frac{j+1}{m+1} + 2\right) \dots \left(\frac{j+1}{m+1} + (N-1)\right)}. \quad (7)$$

Результаты расчетов занесены в табл. 1 и представлены графически (рис. 6-8).

Таблица 1. Значения основных числовых характеристик надежности

Время работы системы, лет	Вероятность безотказной работы, $P_c(t)$	Частота отказов, $a_c(t)$	Интенсивность отказов, $\lambda_c(t)$
0	1	0	0
10	0.997	0.00066	0.00092
20	0.973	0.0031	0.0045
<b>25</b>	<b>0.945</b>	<b>0.0047</b>	<b>0.0069</b>
30	0.907	0.0062	0.0095
<b>33</b>	<b>0.879</b>	<b>0.0070</b>	<b>0.011</b>
<b>41</b>	<b>0.79</b>	<b>0.0086</b>	<b>0.015</b>
50	0.675	0.0095	0.020
60	0.543	0.0092	0.024
70	0.420	0.0082	0.027
80	0.316	0.0067	0.030
90	0.231	0.0053	0.032
100	0.166	0.0040	0.034
120	0.084	0.0021	0.037
140	0.037	0.0010	0.039

Примечание: выделенные значения – время проводимых технических освидетельствований конструкций.

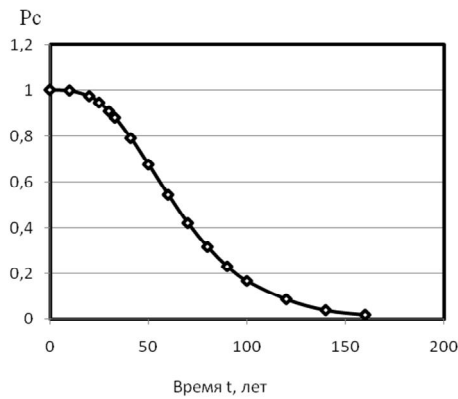


Рис. 6. Вероятность безотказной работы  $P_c(t)$

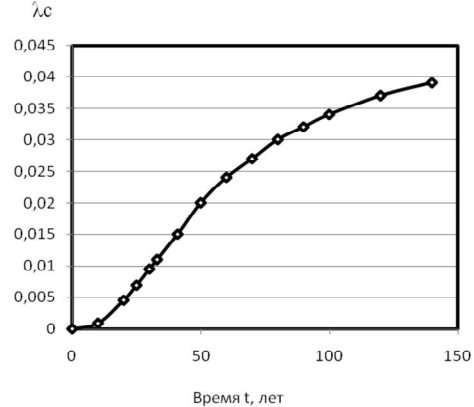


Рис. 7. Частота отказов  $a_c(t)$

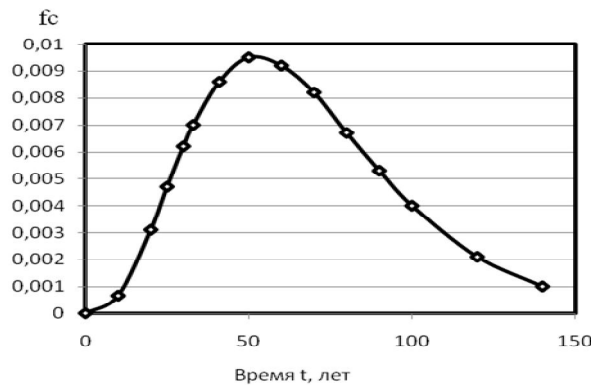


Рис. 8 Интенсивность отказов  $\lambda_c(t)$

По результатам полученных данных было определено среднее время безотказной работы  $T_c$  системы «подстропильная ферма – стропильная ферма». Оно составляет около 28 лет. При этом, если бы остаточный ресурс оценивался по самому нагруженному или поврежденному элементу (а в нашем случае это подстропильные фермы), то срок службы здания  $T_c$  составил бы 47 лет.

#### Л и т е р а т у р а

1. Пшеничкина В.А., Сухина К.Н. Методика оценки остаточного ресурса подстропильных ферм основного корпуса Р-1 ОАО «ВОЛТАЙР-ПРОМ»: статья // Волгогр. гос. архит.-строит. ун-т. – Волгоград: ВолГАСУ, 2013.
2. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций// М.: Машиностроение, 1984. – С. 31-34
3. Острейковский В.А. Теория надежности. – М.: Изд-во «Высшая школа», 2003. – С. 127-132.
4. Половко А.М. Основы теории надежности. – М.: Издательство «Наука», 1964. С. 187-191, 269-274
5. Болотин В.В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. – М.: Стройиздат, 1971.
6. Райзер В.Д. Методы теории надежности в задачах нормирования расчетных параметров строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1986.
7. Ржанецкий А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. – М.: Стройиздат, 1978.
8. Лужин О.В. Обследование и испытание сооружений. – М.: Стройиздат, 1987. – С. 91-150.
9. Raizer V.D. Theory of Reliability in Structural Design// Journal of Applied Mechanics Reviews, USA, 2004. – Vol.57. – No1. – Pp. 1-21.
10. Raizer V.D. Reliability of Structures. Analysis and Applications. – Backbone Publishing Company. – New York, USA, 2009. – 146 p.

#### References

1. Pshenichkina, V.A., Suhina, K.N. (2013). A method of evaluation of residual resource of the main body of the R-1 OAO «VOLTAYR-Prom»: statiya, Volgogr. gos. arhit.- stroit. univer, Volgograd: VolgASU.
2. Bolotin, V.V. (1984). *Prognozirovanie Resyrsa Mashin i Konstruktziy*, Moscow: Mashinostroenie, p. 31-34.
3. Ostreikovskiy, V.A. (2003). *Teoriya Nadezhnosti*, M.: Izd-vo "Visshaya shkola", pp.127-132.
4. Polovko, A.M. (1964). *Osnovi Teorii Nadezhnosti*, Moscow: Izd-vo "Nauka", pp. 187-191, pp. 269-274.
5. Bolotin, V.V. (1971). *Primenenie Metodov Teorii Veroyatnostei i Teorii Nadezhnosti v Raschetah Sooruzhenii*, Moscow: "Stroiizdat".
6. Raizer, V.D. (1986). *Metodi Teorii Nadezhnosti v Zadachah Normirovaniya Raschetnih Parametrov Stroitelnih Konstruktziy*, Moscow: "Stroiizdat".
7. Rzanecin, A.R. (1978). *Teoriya Rascheta Stroitelnih Konstryktziy na Nadezhost*, M.: "Stroiizdat".
8. Luzhin, O.V.(1971). *Obsledovanie i Ispitanie Sooruzheniy*, Moscow: "Stroiizdat".
9. Raizer, V.D. (2004). Theory of Reliability in Structural Design, *Journal of Applied Mechanics Reviews*, USA, Vol. 57, No 1, pp. 1-21.
10. Raizer, V.D. (2009). Reliability of Structures. Analysis and Applications, Backbone Publishing Company, New York, USA, 146 p.

### THE EVOLUTION OF RESIDIAL RESOURCE OF THE MAIN BUILDING R-1 OF "VOLTAYR-PROM" AS A COMPLEX STRUCTURE

Suhina K.N., Pshenichkina V.A.

In this paper, we have proposed a method for determining the law of variation of the resource and the prediction of the service life of the existing buildings, we have modeled the diagram of the main supporting structures of the coating in the form of a complex redundant system with a permanent source, the results of the main numerical characteristics of reliability and determined the mean time between failures of the system "post farm - truss".

KEY WORDS: residual life, farm, numerical characteristics of reliability, redundant systems, mean time between failures.