

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ EXPERIMENTAL RESEARCH

DOI: 10.22363/1815-5235-2025-21-4-346-357

EDN: CKYDNO

Научная статья / Research article

Методы предсказательного моделирования для оценки остаточной прочности деревянных конструкций на основе экспериментальных данных

С.И. Абрахин¹, А.В. Лукина²✉, М.С. Лисятников¹, Д.А. Чибрикин¹¹ Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Владимир, Российская Федерация² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация
✉ pismo.33@yandex.ru

Поступила в редакцию: 29 апреля 2025 г.

Доработана: 21 июля 2025 г.

Принята к публикации: 27 июля 2025 г.

Аннотация. Оценка несущей способности и прогнозирование остаточной прочности существующих конструкций является одной из самых сложных задач. Такое прогнозирование обычно выполняется на основе экспериментальных разрушающих испытаний образцов. Предложена методология прогнозирования остаточной прочности деревянных конструкций, основанная на результатах экспериментальных исследований по определению кратковременного сопротивления чистой древесины. В качестве объектов исследования были выбраны деревянные стропильные системы жилых домов 1950-х и начала 1960-х гг. постройки в г. Владимире. Для построения предсказательной модели остаточного ресурса конструкции были применены методы интерполяции и экстраполяции. Приведены подробные расчеты, наглядно показывающие возможность применения этих методов. Определено, что метод авторегрессии (метод Берга) показывает хорошие предсказательные результаты, коррелирующийся с экспериментальными данными других исследований и теоретическими предположениями. Прогнозирование остаточного ресурса конструкции является ключевым фактором в обеспечении надежности и безопасности зданий, а также уменьшении эксплуатационных расходов в будущем.

Ключевые слова: здания, деревянные конструкции, прогнозирование, прочность, долговечность, интерполяция, экстраполяция

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов: *Абрахин С.И.* — расчет и построение прогнозных моделей; *Лукина А.В.* — разработка программы исследований для получения экспериментальных данных, постановка цели и задачи исследования, написание текста, формулировка выводов; *Лисятников М.С.* — анализ современного состояния применения деревянных конструкций, литературный обзор; *Чибрикин Д.А.* — оформление графического материала, перевод на английский язык. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Сергей Иванович Абрахин, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Российская Федерация, 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87; eLIBRARY SPIN-код: 2121-2007, ORCID: 0009-0002-8589-4826; e-mail: abrahin_s@vlsu.ru

Лукина Анастасия Васильевна, кандидат технических наук, доцент кафедры архитектурно-строительного проектирования и физики среды, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Российская Федерация, 129337, Центральный федеральный округ, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARY SPIN-код: 8745-0004, ORCID: 0000-0001-6065-678X; e-mail: pismo.33@yandex.ru

Лисятников Михаил Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Российская Федерация, 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87; eLIBRARY SPIN-код: 4089-7216, ORCID: 0000-0002-5262-6609; e-mail: mlisyatnikov@mail.ru

Чибрикин Данила Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Российская Федерация, 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87; eLIBRARY SPIN-код: 1809-6997, ORCID: 0000-0001-9278-4559; e-mail: dachibrikina@outlook.com

© Абрахин С.И., Лукина А.В., Лисятников М.С., Чибрикин Д.А., 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания в области научной деятельности (тема FZUN-2024-0004, государственное задание ВЛГУ).

Для цитирования: Абрахин С.И., Лукина А.В., Лисятников М.С., Чибрикин Д.А. Методы предсказательного моделирования для оценки остаточной прочности деревянных конструкций на основе экспериментальных данных // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2025. Т. 21. № 4. С. 346–357. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2025-21-4-346-357>

Predictive Modeling Methods for Estimating the Residual Strength of Wooden Structures Based on Experimental Data

Sergey I. Abrakhin¹, Anastasiya V. Lukina²✉, Mikhail S. Lisyatnikov¹, Danila A. Chibrikin¹

¹ Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs *Vladimir, Russian Federation*

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), *Moscow, Russian Federation*

✉ pismo.33@yandex.ru

Received: April 29, 2025

Revised: July 21, 2025

Accepted: July 27, 2025

Abstract. Estimating the load-bearing capacity and predicting the residual strength of existing structures is one of the most difficult tasks. Such prediction is usually performed on the basis of experimental destructive testing of samples. A methodology for predicting the residual strength of wooden structures is proposed, based on the results of experimental studies to determine the short-term resistance of pure wood. Wooden rafter systems of residential buildings built in the 1950s and early 1960s in Vladimir were chosen as objects of research. Interpolation and extrapolation methods were used to build a predictive model of the residual life of a structure. Detailed calculations are given, which clearly show the possibility of using these methods. It is determined that the autoregression method (Burg method) shows good predictive results, correlating with experimental data from other studies and theoretical assumptions. Forecasting the remaining life of a structure is a key factor in ensuring the reliability and safety of buildings, as well as reducing future operating costs.

Keywords: buildings, wooden structures, forecasting, strength, durability, interpolation, extrapolation

Conflicts of interest. The authors declare that there is no conflict of interest.

Authors' contribution: *Abrakhin S.I.* — calculation and construction of predictive models; *Lukina A.V.* — development of a research program for obtaining experimental data, setting the goal and objectives of the research, writing, formulation of conclusions; *Lisyatnikov M.S.* — analysis of the current state of the use of wooden structures, literature review; *Chibrikin D.A.* — design of graphic material, translation into English. All authors read and approved the final version of the article.

Funding. The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment in the field of scientific activity (theme FZUN-2024-0004, state assignment of the VISU).

For citation: Abrakhin S.I., Lukina A.V., Lisyatnikov M.S., Chibrikin D.A. Predictive modeling methods for estimating the residual strength of wooden structures based on experimental data. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2025;21(4):346–357. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2025-21-4-346-357>

1. Введение

Общеизвестно, что основным потребителем древесины является строительная отрасль [1; 2]. Любое здание можно рассматривать как систему, каждый элемент которой имеет свой срок службы. Согласно Своду правил СП 64.13330¹, действующему на территории Российской Федерации, срок службы деревянных элементов и конструкций здания массового строительства в обычных условиях эксплуатации (здания жилищно-гражданского и производственного строительства) составляет не менее 50 лет. Анализ научной литературы показывает, что зачастую деревянные конструкции эксплуатируются за пределами норм службы [3; 4]. Имеющийся запас технического ресурса древесины позволяет применять ее в элементах деревянных конструкций уникальных зданий и сооружений [5].

¹ СП 64.13330. СНиП II-25-80 Деревянные конструкции. Москва, 2017. 102 с.

Из анализа источников по исследованию напряженно-деформированного состояния эксплуатируемых деревянных конструкций можно отметить, что практически отсутствуют данные и рекомендации, по оценке и прогнозированию их прочностного ресурса, в частности за пределами норм сроков службы [6].

Для обеспечения безопасности и долговечности конструкции необходимо учитывать факторы, влияющие на надежность деревянных конструкций: внутренние напряжения в конструкциях, не соответствующие их проектным значениям; внешние воздействия; система технического обслуживания (предупредительного и систематического); техническая квалификация обслуживающего и ремонтного персонала [7; 8].

В процессе эксплуатации происходит изменение физико-механических свойств древесины, что приводит к появлению дефектов [9]. Многие дефекты носят постепенный характер: параметры системы по мере эксплуатации постепенно ухудшаются и в некоторый момент времени достигают значений, при которых дальнейшая эксплуатация становится невозможной или нецелесообразной [10; 11].

Исследование и разработка рекомендаций к обоснованию остаточного ресурса для деревянных конструкций позволяет корректно спрогнозировать необходимые материальные ресурсы для проведения ремонта, а также обосновать целесообразность постройки нового здания или сооружения для замены уже существующего в случае необходимости. Таким образом, создание надежной модели прогнозирования остаточной прочности деревянных конструкций является ключевой задачей.

Цель данной методологии — выполнение предсказательного моделирования для оценки остаточной прочности деревянных конструкций на примере стропильной системы (нога) исключительно на основе результатов экспериментальных исследований образцов, что является основной новизной данного исследования.

2. Методы

Для составления программы экспериментальных исследований требуется выявить факторы, влияющие на достоверность полученных результатов и количество проводимых экспериментов [12]. Недостаточное количество влияющих факторов приведет к посредственным результатам, которые нельзя будет принять как достоверные без дополнительных исследований [13]. Расширенное количество влияющих факторов повысит точность результатов работы, однако это одновременно приведет к увеличению количества опытов и снижению экономического эффекта исследования.

Оптимальными факторами для оценки остаточного прочностного ресурса за пределами норм сроков службы несущих деревянных конструкций считаются следующие:

- класс функционального назначения;
- условия эксплуатации;
- срок эксплуатации объекта капитального строительства;
- наличие сведений о текущих/капитальных ремонтах;
- физический износ конструктивных элементов;
- вид несущей конструкции по напряженно-деформированному состоянию;
- особенности компоновки поперечного сечения;
- режим нагружения конструктивного элемента.

Учет вышеуказанных факторов позволил составить необходимую программу экспериментальных исследований и обеспечить достоверность полученных результатов [14].

В качестве объектов, на которых производился отбор стандартных образцов древесины, для исследования физико-механических характеристик были выбраны жилые дома 1950-х и начала 1960-х гг. постройки в г. Владимире (табл. 1).

Образцы отобраны из конструктивных элементов, находящихся в одинаковом напряженно-деформированном состоянии (стропильные ноги). Заготовки для изготовления стандартных образцов отбирались из конструктивных элементов, не имеющих видимых дефектов и повреждений. Затем из выпиленных из конструкций заготовок в лабораторных условиях изготавливались малые

стандартные образцы для определения предела прочности древесины при сжатии вдоль волокон по межгосударственному стандарту ГОСТ 16483.10-73². По результатам испытаний была проведена статистическая обработка данных.

Физический износ деревянных конструкций жилых зданий определялся методом экспертных оценок [15]. Полученные экспериментальные результаты кратковременного сопротивления чистой древесины (табл. 1) послужили исходными данными для предсказательного моделирования по оценке остаточной прочности деревянных конструкций (табл. 2).

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований образцов из древесины при сжатии вдоль волокон

Вид конструкции	Стропильная нога				
Назначение здания	Жилой дом				
Срок эксплуатации	Новая	49	60	64	65
Год постройки	–	1974	1963	1959	1958
Год испытаний	2023	2023	2023	2023	2023
Кратковременное сопротивление чистой древесины R^n , МПа	30	29,6	27,87	25,38	24,13
Физический износ, %	–	37	43	46	46

И с т о ч н и к: выполнено А.В. Лукиной

Для более точного предсказательного моделирования оценки остаточной прочности деревянных конструкций определим значения расчетных сопротивлений (R^p) при сроке службы сооружения 75 и 100 лет согласно СП 64.13330:

$$R^p = R^A m_{дл} \Pi m_i.$$

Тогда расчетное сопротивление для II сорта древесины R^p (изгиб, сжатие и смятие вдоль волокон) при сроке службы 75 лет составит: $R^p = 19,5 \times 0,66 \times 0,9 = 11,5$ МПа, для 100 лет и более:

$$R^p = 19,5 \times 0,66 \times 0,8 = 10,3 \text{ МПа}.$$

Таким образом, минимальное значение расчетного сопротивления не может быть меньше 10,3 МПа. Это значение учитывает снижение прочностных характеристик древесины с течением времени из-за длительного воздействия нагрузок и факторов окружающей среды.

Запишем экспериментальные результаты кратковременного сопротивления чистой древесины в табличном виде для интерполяции и экстраполяции (табл. 2).

Представим экспериментальные значения кратковременного сопротивления древесины в виде узловых точек на графике (рис. 1).

Таблица 2

Экспериментальные результаты кратковременного сопротивления чистой древесины для интерполяции и экстраполяции

№	1	2	3	4	5
t	0	49	60	64	65
R^n	30	29,6	27,87	25,38	24,13

И с т о ч н и к: выполнено А.В. Лукиной

² ГОСТ 16483.10-73. Древесина. Методы определения предела прочности при сжатии вдоль волокон. Москва : ИПК Издательство стандартов, 1999. 7 с.

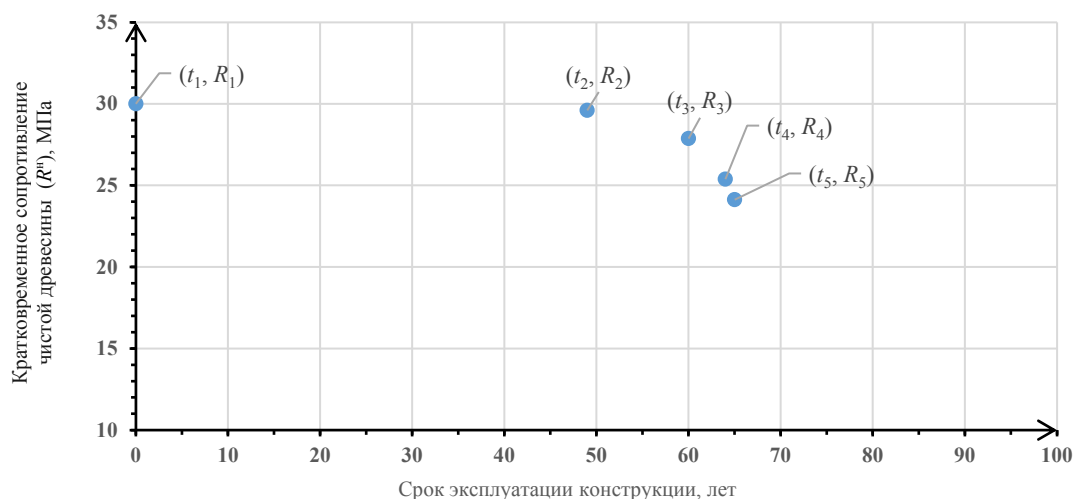


Рис. 1. Узловые точки экспериментальных данных

И с т о ч н и к: выполнено А.В. Лукиной

Для представления закономерностей, а также при проведении научно-технических расчетов часто используются зависимости вида $y(x)$, причем число заданных точек (далее узловых) этих зависимостей ограничено. Неизбежно возникает задача приближенного вычисления значений функций в промежутках между узловыми точками (интерполяция) и за пределами (экстраполяция). Эта задача решается ее подменой какой-либо достаточно простой функцией. Таким образом, для оценки значения кратковременного сопротивления чистой древесины деревянных конструкций на наблюдаемом, историческом, периоде времени (0–65 лет) и прогнозирования их будущего поведения (прогнозный период 66–200 лет) необходимо использовать методы интерполяции и экстраполяции.

Снижение прочности деревянных конструкций может происходить вследствие биоэрозии или физического износа [16]. Необходимо отметить, что в задачу предсказательного моделирования не входило выявление причин снижения прочности. Авторы выполнили моделирование, полагая, что деревянные конструкции находились в нормальных условиях эксплуатации.

2.1. Интерполяция экспериментальных данных

Интерполяция позволяет оценить значения сопротивления для тех условий, для которых нет непосредственных измерений, но при этом интерполированные значения будут точно совпадать с имеющимися экспериментальными данными. Результаты интерполяции за пределами диапазона имеющихся экспериментальных данных рассматривать не будем.

Наиболее часто применяемые методы интерполяции:

- кусочно-линейная интерполяция;
- полиномиальная интерполяция;
- сплайн-интерполяция.

■ **Кусочно-линейная интерполяция.** Кусочно-линейная интерполяция — это простой метод, который предполагает, что значение параметра между двумя известными точками значениями экспериментальных данных меняется линейно.

Кусочно-линейная интерполяция состоит в представлении таблично заданной функции на каждом отрезке между абсциссами узловых точек линейной зависимостью $R(t) = a_1 + a_2 t$. Коэффициенты a_1 и a_2 определяются для каждого отрезка $[t_{i-1}, t_i]$ в отдельности из условий

$$\begin{cases} R(t_{i-1}) = R_{i-1}; \\ R(t_i) = R_i. \end{cases}$$

В результате кусочно-линейная приближающая функция на отрезке $[t_{i-1}, t_i]$ имеет вид $R_{(i-1)...i}(t) = R_{i-1} + \frac{R_i - R_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}(t - t_{i-1})$ и является непрерывной.

Для экспериментальных данных, представленных в табл. 2, кусочно-линейная функция примет вид

$$R(t) = \begin{cases} 30 - 0,00816 \cdot t, & \text{при } t \in [0; 49]; \\ 37,30636 - 0,15727 \cdot t, & \text{при } t \in [49; 60]; \\ 65,22 - 0,6225 \cdot t, & \text{при } t \in [60; 64]; \\ 105,38 - 1,25 \cdot t, & \text{при } t \in [64; 65]. \end{cases} \quad (1)$$

График кусочно-линейной интерполяции представлен на рис. 2. Интерполированные данные значений кратковременного сопротивления чистой древесины, полученные на историческом временном интервале при кусочно-линейной интерполяции, будут использованы для прогнозирования их будущего поведения при экстраполяции.

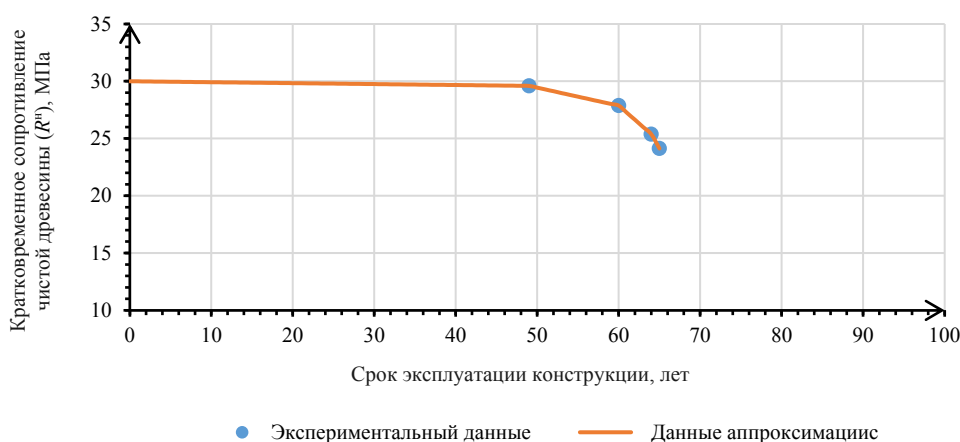


Рис. 2. Кусочно-линейная интерполяция кратковременного сопротивления чистой древесины

И с т о ч н и к: выполнено С.И. Абрахиным

■ **Полиномиальная интерполяция.** Полиномиальная интерполяция использует степенные полиномы для интерполяции зависимости между точками. Является более точным методом, чем линейная интерполяция, особенно когда зависимость нелинейная. Такими полиномами выступают полиномы Ньютона и Лагранжа. Это один и тот же полином, но его коэффициенты находятся разными способами [17]. Рассмотрим интерполяцию экспериментальных данных полиномом Лагранжа.

Интерполяционный полином Лагранжа — это метод построения степенного многочлена, который точно проходит через заданный набор точек (узлов интерполяции) $(t_1, R_1), \dots, (t_5, R_5)$, то интерполяционный многочлен Лагранжа $P(t)$ будет таким, что $P(t_i) = R_i$ для всех $i = 1, \dots, 5$.

Этот метод относится к классу методов интерполяции, которые позволяют нам восстанавливать (приближать) значения функции в точках, не заданных явно, на основе известного набора значений функции в других точках.

Интерполяционный полином Лагранжа имеет следующий вид:

$$P(t) = \sum_i R_i L_i(t), \quad (2)$$

где: $P(t)$ — интерполяционный многочлен степени не выше количества узлов интерполяции; R_i — значение функции в узле интерполяции t_i ; $L_i(t)$ — базовый многочлен Лагранжа, который имеет вид

$$L_i(t) = \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^5 \frac{(t - t_j)}{(t_i - t_j)}, \quad (3)$$

здесь: t — переменная, для которой вычисляется значение многочлена; t_i — абсцисса i -го узла интерполяции; t_j — абсцисса j -го узла интерполяции.

В результате подстановки экспериментальных данных и проведения вычислений в пакете Mathcad, полином Лагранжа примет вид

$$P(T) = -0,000083992644260501403349t^4 + 0,014084946303696303695t^3 - \\ - 0,7867660724691974691t^2 + 14,607068815113457969t + 30,0.$$

График полином Лагранжа представлен на рис. 3.

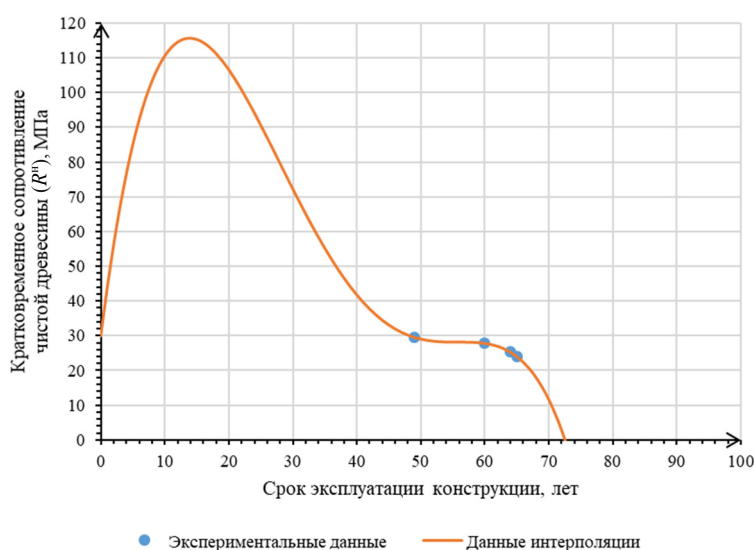


Рис. 3. Интерполяция полиномом Лагранжа кратковременного сопротивления чистой древесины
И с т о ч н и к: выполнено С.И. Абрахиным

Интерполированные данные значений кратковременного сопротивления чистой древесины, полученные на историческом временном интервале при интерполяции полиномом Лагранжа, не могут быть использованы для прогнозирования их будущего поведения методами экстраполяции, так как интерполированные значения на временном интервале от 0 до 49 лет достигают более 100 МПа, что не соответствует физическому поведению материала.

■ **Сплайн-интерполяция** — это метод построения гладкой функции, проходящей через заданные узловые точки экспериментальных данных. Функция построена из сегментов, каждый из которых представляет собой отдельную кубическую функцию, подобранную так, чтобы в узловых точках были непрерывны не только сама функция, но и ее первая и вторая производные. На границах экспериментальных данных, где полной стыковки производных достичь невозможно, применяются дополнительные условия: линейные граничные условия, которые задают нулевые вторые производные на границах; параболические условия — обеспечивают, чтобы крайние отрезки сплайна были параболлами, коэффициент при кубическом члене равен нулю; и кубические условия — гарантируют, что сплайн на границах ведет себя как кубический полином [18].

На рис. 4 приведены результаты сплайн-интерполяции экспериментальных данных, проведенной в MathCad, где R_l , R_p и R_c — сплайн-интерполяция при линейных, параболических и кубических условиях на границах соответственно.

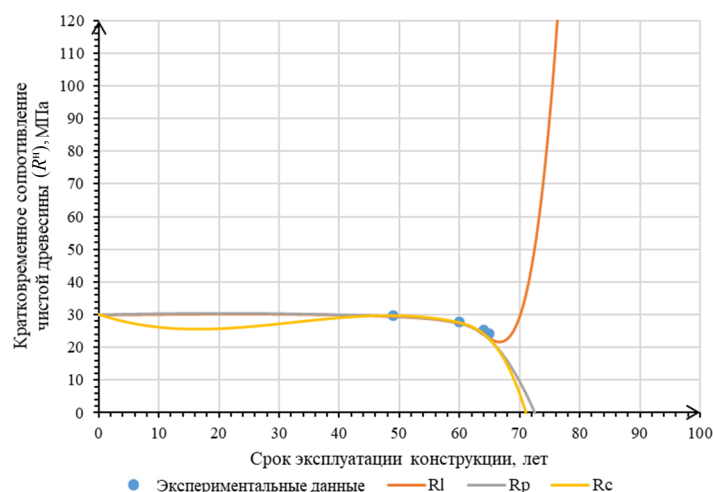


Рис. 4. Сплайн-интерполяция кратковременного сопротивления чистой древесины

И с т о ч н и к: выполнено С.И. Абрахиным

Результаты сплайн-интерполяции при использовании кубических условий на границах экспериментальных данных (R_c) не подходят для прогнозирования их дальнейшего поведения методом экстраполяции. Причина в том, что интерполированные значения демонстрируют значительное падение прочности до ~ 25 МПа на временном интервале от 0 до 49 лет, а затем неожиданный рост, что противоречит природе деградации свойств древесины. Напротив, интерполированные данные, полученные при использовании линейных (R_l) и параболических (R_p) граничных условий на границах экспериментальных данных для сопряжения первой и второй производной, показывают умеренный рост значений кратковременного сопротивления чистой древесины на временном интервале от 0 до 49 лет до $\sim 30,5$ МПа. Полученные данные могут применяться для прогнозирования поведения в будущем методом экстраполяции, так как соответствуют физическому поведению древесины.

2.2. Экстраполяция экспериментальных данных

Экстраполяция — метод оценки значений кратковременного сопротивления древесины за пределами диапазона имеющихся экспериментальных данных. Она используется для прогнозирования значений сопротивления чистой древесины в будущем или при других, неисследованных условиях. Экстраполяция является более рискованной, чем интерполяция, так как предполагает, что зависимость, выявленная в пределах экспериментальных данных, будет сохраняться и за их границами.

Экстраполяция экспериментальных данных — это процесс подбора математической функции или модели, которая наилучшим образом описывает набор экспериментальных узловых точек. Цель — найти зависимость между переменными, которая минимизирует ошибку между предсказанными значениями модели и реальными экспериментальными данными.

Экстраполяцию степенным полиномом степени n : $R_n(t) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i t^i$ и линейной функцией, которая является его частным случаем при $n=1$, рассматривать не будем, так как эти результаты будут соответствовать полиномиальной интерполяции.

Рассмотрим следующие варианты экстраполяции для имеющихся экспериментальных данных:

– экспоненциальная экстраполяция: $R_{\text{exp}}(t) = ae^{bt} + c$;

– логистическая экстраполяция: $R_{\text{lg}}(t) = \frac{a}{1 + be^{-ct}}$;

– синусоидальная экстраполяция: $R_{\text{sin}}(t) = a \sin(t + b) + c$;

– степенная экстраполяция: $R_{\text{pwr}}(t) = at^b + c$;

– логарифмическая экстраполяция: $R_{\text{log}}(t) = a \ln(b + t) + c$.

По результатам минимизации ошибки между значениями модели и реальными экспериментальными данными вычисляются коэффициенты a , b и c , которые при подстановке позволят оценить значение сопротивления вне диапазона экспериментальных данных.

Результаты экстраполяции экспериментальных данных, проведенные в пакете MathCad, представлены на рис. 5.

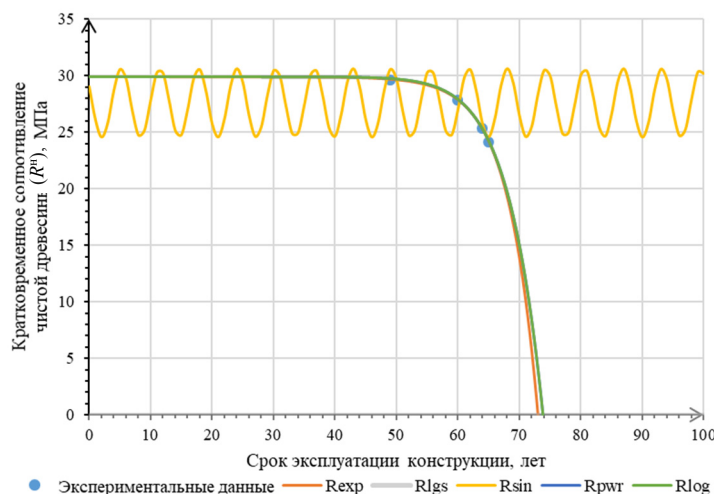


Рис. 5. Аппроксимация значений кратковременного сопротивления чистой древесины

И с т о ч н и к: выполнено С.И. Абрахиным

Из полученных результатов можно сделать вывод, что синусоидальная $R_{\sin}$ экстраполяция дает изменение значений сопротивления в пределах от ≈ 25 до ≈ 31 МПа с периодом около 7 лет. Сигмоидальная R_{sgn} и логарифмическая $R_{\log}$ экстраполяция дают постоянное значение (30 и 0 соответственно). Экспоненциальная R_{exp} и степенная R_{pwt} экстраполяция показывает неплохие результаты на историческом диапазоне экспериментальных данных коэффициентом детерминации 0,999 и 0,998 соответственно, но за пределами исторического периода значение сопротивления становится отрицательным уже к 75 годам, что не соответствует действительности. Поэтому данные методы экстраполяции не могут применяться для прогнозирования остаточной прочности деревянных конструкций.

Остается вариант с экстраполяцией экспериментальных данных методом авторегрессии. Метод авторегрессии (AR) — это статистический метод анализа временных рядов, который используется для прогнозирования будущих значений ряда на основе его предыдущих наблюдений.

Основная идея метода авторегрессии заключается в том, что текущее значение временного ряда можно представить как линейную комбинацию нескольких предыдущих значений этого же ряда и случайной ошибки. Формула модели авторегрессии выглядит следующим образом:

$$R_t = a_{t-1}R_{t-1} + a_{t-2}R_{t-2} + \dots + a_{t-p}R_{t-p} + \varepsilon, \quad (4)$$

где R_t — текущее значение временного ряда; a_{t-1} , a_{t-2} , ..., a_{t-p} — коэффициенты регрессии; R_{t-1} , R_{t-2} , ..., R_{t-p} — значения временного ряда за предыдущие периоды; p — порядок модели (сколько прошлых значений ряда учитывается); $\varepsilon(p)$ — ошибка предсказания.

Одним из методов авторегрессии является метод Берга. Его основной задачей является нахождение коэффициентов a_{t-1} , a_{t-2} , ..., a_{t-p} , которые минимизируют ошибку предсказания $\varepsilon(p)$. Главное отличие метода Берга от других алгоритмов заключается в том, что он минимизирует ошибку предсказания как в прямом, так и в обратном направлении. Это приводит к более стабильным и надежным оценкам коэффициентов, особенно при работе с короткими временными рядами.

Результаты экстраполяции, проведенные в пакете MathCad, по методу Берга интерполяции экспериментальных данных, полученных в результате кусочно-линейной интерполяции, показаны на рис. 6.

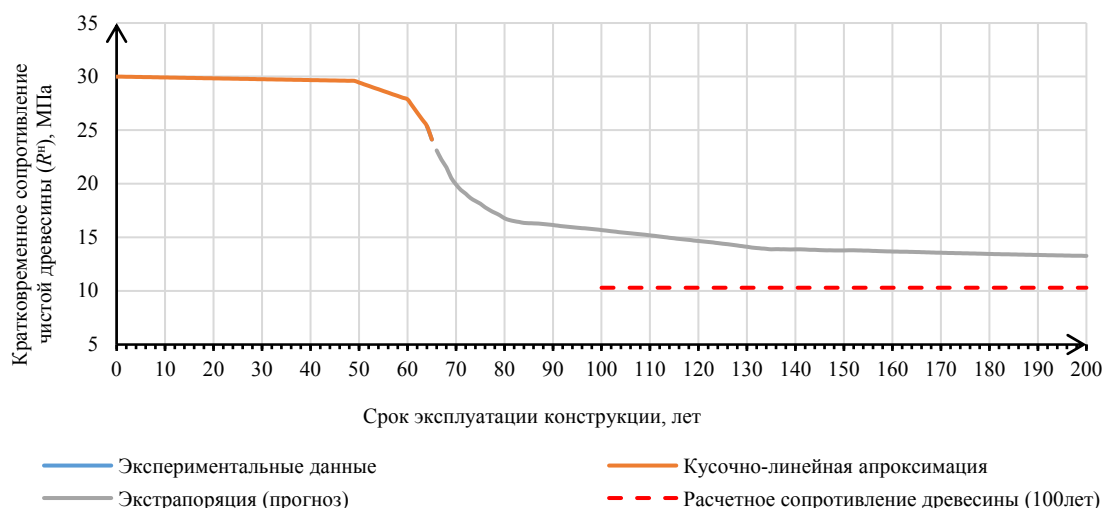


Рис. 6. Результаты экстраполяции кусочно-линейной интерполяции экспериментальных данных
Источники: выполнено С.И. Абрахиным и А.В. Лукиной

3. Результаты и обсуждение

Разработанную модель (рис. 6) следует проверить путем сравнения с теоретическими и экспериментальными исследованиями [19; 20]. Как видно из графика на рис. 6, система, предложенная в качестве предсказательной модели для оценки остаточной прочности деревянных конструкций, согласуется с кривой длительного сопротивления древесины, разработанной Ф.П. Белянкиным, Ю.М. Ивановым и экспоненциальным законом Вейбулла [21; 22]. Асимптотический характер кривой длительного сопротивления древесины показывает, что предел прочности с увеличением длительности приложенной нагрузки хотя и падает, но не безгранично — он стремится к некоторому постоянному значению $\sigma_{дл}$, равному ординате асимптоты кривой [23; 24].

В контексте надежности деревянных конструкций использование экспоненциального закона Вейбулла позволяет учесть вариабельность механических свойств древесины и оценить вероятность разрушения под длительным воздействием нагрузки. В прикладных расчетах надежность системы выражают экспоненциальным законом [25]. Часто применяют также модель, в основе которой лежит распределение Вейбулла. Вероятность безотказной работы определяют как

$$P(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{t_c} \right)^\beta \right], \quad (5)$$

где, t_c и β — положительные параметры.

При $\beta > 1$ формула (5) описывает поведение «стареющих» объектов, у которых интенсивность отказов со временем возрастает. Обычно в начале интенсивность отказов относительно велика. Затем она снижается и остается примерно постоянной в течение длительного интервала эксплуатации, увеличиваясь к концу его вследствие старения или износа.

Разработанный график предсказательного моделирования для оценки остаточной прочности деревянных конструкций (стропильных ног) на основе экспериментальных данных (см. рис. 6) носит нелинейную зависимость, где начальная прочность древесины уменьшается с увеличением времени воздействия нагрузки. Важной особенностью этой кривой является то, что она позволяет учитывать фактор времени при оценке прочности древесины, что критично для долгосрочного проектирования конструкций.

В работе [26] определены значения предела прочности стропильных ног в жилых зданиях, построенных в 1930-х гг.: 15,25 и 15,36 МПа. На момент экспериментальных исследований срок

эксплуатации конструкций составлял чуть более 90 лет. Анализируя предсказательное моделирование для оценки остаточной прочности деревянных конструкций на основе метода Берга, можно обнаружить, что опытные данные автора [27] очень хорошо коррелируются с графиком на рис. 6.

Кривая предсказательного моделирования может быть интерпретирована как отражение изменения параметра прочности во времени. По мере увеличения времени воздействия нагрузки параметр прочности уменьшается, что приводит к увеличению вероятности отказа (разрушения). Таким образом, разработанный график предсказательного моделирования может использоваться для количественного анализа остаточной прочности древесины во времени.

4. Заключение

Интерполяция и экстраполяция экспериментальных данных кратковременного сопротивления чистой древесины являются важными инструментами для оценки остаточного ресурса деревянных конструкций. Они позволяют использовать ограниченные данные для прогнозирования изменения прочностных характеристик древесины с течением времени, что является необходимым для безопасной и эффективной эксплуатации деревянных конструкций.

Экстраполяция, будучи более рискованным процессом, требует применения математических моделей старения древесины и подтверждения результатов дополнительными экспериментальными исследованиями.

1. Предложена интерпретация процессов деформации, деградации прочности деревянных конструкций на основе моделирования значений остаточной прочности деревянных конструкций, полученных экспериментальным путем.

2. Разработан и реализован алгоритм предсказательного моделирования для оценки остаточной прочности деревянных конструкций на основе экспериментальных данных.

3. Разработанный график предсказательного моделирования для оценки остаточной прочности деревянных конструкций имеет хорошую сходимость с теоретическими предпосылками и экспериментальными результатами других исследований.

4. Использование описанных подходов поможет инженерам более эффективно управлять жизненным циклом деревянных конструкций, обеспечивая их надежность и долговечность.

Использование результатов работы при актуализации нормативной базы и практике строительства (ремонта) обеспечит приспособленность деревянных несущих конструкций к предупреждению и устранению отказов путем проведения технического обслуживания и своевременных ремонтов.

Список литературы

1. *Repin V.A., Lukina A.V., Strekalkin A.A.* Parameterization of Maxwell — Cremona diagram for determining forces in elements of a scissors truss // *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2024. Vol. 20. No. 2. P. 97–108. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2024-20-2-97-108> EDN: KZTKLX
2. *Gribanov A.S., Roshchina S.I., Popova M.V., Sergeev M.S.* Laminar polymer composites for wooden structures // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. Vol. 7. No. 83. P. 3–11. <http://doi.org/10.18720/MCE.83.1> EDN: ZDIKJN
3. *Jašek M., Stejskalová K., Fojtík R., Ingeli R.* Analysis of the service life of wooden bridge structures using structural protection. *Case Studies in Construction Materials*. 2025. Vol. 22. Article no. e04453. <http://doi.org/10.1016/J.CSCM.2025.E04453>
4. *Yadav S., Purchase D.* Biodeterioration of cultural heritage monuments: A review of their deterioration mechanisms and conservation // *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2025. Vol. 201. Article no. 106066. <http://doi.org/10.1016/J.IBIOD.2025.106066>
5. *Qiao Ze.H., Jiang Sh.F., Tang W.J., Li Ni.L.* Dual-indicator prediction model for the safety of Chinese ancient wooden structures subjected to bioerosion // *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 43. Article no. 102868. <http://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.102868> EDN: XLWCSO
6. *Mackiewicz M., Zimiński K., Pawłowicz J.A., Knyziak P.* Evaluation of the historic wooden structure condition based on the results of non-destructive tests // *Engineering Failure Analysis*. 2024. Vol. 159. Article no. 108116. <http://doi.org/10.1016/J.ENGFAILANAL.2024.108116> EDN: GQTVZV

7. Andersen C.E., Hoxha E., Rasmussen F.N., Sorensen C.G., Birgisdottir H. Temporal considerations in life cycle assessments of wooden buildings: Implications for design incentives // *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 445. Article no. 141260. <http://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2024.141260> EDN: DPSBPV
8. Califano A., Leijonhufvud G., Bichlmair S., Kilian R., Wessberg M., Sepe R., Lamanna G., Bertolin C. Cumulative climate-induced fatigue damage in wooden painted surfaces: The case of wooden churches in Sweden // *Journal of Cultural Heritage*. 2024. Vol. 67. P. 313–325. <http://doi.org/10.1016/J.CULHER.2024.03.017> EDN: QRXCCF
9. Silva A., de Brito J. Service life of building envelopes: A critical literature review // *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 44. Article no. 102646. <http://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.102646> EDN: GPEQBG
10. Shirmohammadi M., Leggate W., Redman A. Effects of moisture ingress and egress on the performance and service life of mass timber products in buildings: a review // *Construction and Building Materials*. 2021. No. 290. Article no. 123176. <http://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.123176> EDN: JOSSIT
11. Wang Q., Wang Z., Feng X., Zhao Y., Li Z. Mechanical properties and probabilistic models of wood and engineered wood products: A review of green construction materials // *Case Studies in Construction Materials*. 2024. No. 21. Article no. e03796. <http://doi.org/10.1016/J.CSCM.2024.E03796> EDN: GGNEVS
12. Gomon S., Homon S., Pavluk A., Matviuk O., Sasiuk Z., Puhach Y., Svyrydiuk O. Hypotheses and prerequisites for modelling the stress-strain state of wooden element normal cross-section using the deformation calculation method // *Procedia Structural Integrity*. 2024. Vol. 59. P. 559–565. <http://doi.org/10.1016/J.PROSTR.2024.04.079> EDN: JCSSOQ
13. Lisyatnikov M., Lukina A., Lukin M., Roschina S. Experimental study of a wooden girder truss with composite chords // *Architecture and Engineering*. 2024. Vol. 9. No. 2. P. 47–56. <http://doi.org/10.23968/2500-0055-2024-9-2-47-56> EDN: IFJAHS
14. Рощина С.И., Лукина А.В., Нармания Б.Е., Лисятников М.С., Лукин М.В. Исследование жизненного цикла деревянных покрытий зданий текстильной промышленности // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2024. № 4. С. 201–208. http://doi.org/10.47367/0021-3497_2024_4_201 EDN: LZQWBR
15. Черных А.Г., Корольков Д.И., Данилов Е.В., Казакевич Т.Н., Коваль П.С. Оценка остаточного ресурса деревянных конструкций по величине физического износа // *Жилищное строительство*. 2022. № 4. С. 66–72. <http://doi.org/10.31659/0044-4472-2022-4-66-71> EDN: OFDSHE
16. Рощина С.И., Лукина А.В., Сергеев М.С., Власов А.В., Грибанов А.С. Восстановление деревянных конструкций импрегнированием полимерной композицией на примере промышленных зданий легкой и текстильной промышленности // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2016. № 5 (365). С. 76–80. EDN: XHYJRT
17. Lam D.H., Cuong L.N., Van Manh P., Van Minh N. On the conditioning of the Newton formula for Lagrange interpolation // *Journal of Mathematical Analysis and Applications*. 2022. No. 1 (505). Article no. 125473. <http://doi.org/10.1016/J.JMAA.2021.125473>
18. Калиткин Н.Н. Численные методы: учеб. пособие. 2-е изд., исправленное. СПб. : БХВ-Петербург, 2011. 592 с.
19. Зотеев В.Е., Макаров Р.Ю. Численный метод определения параметров модели ползучести в пределах первых двух стадий // *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2017. Т. 16. № 2. С. 145–156. <http://doi.org/10.18287/2541-7533-2017-16-2-145-156> EDN: ZAETON
20. Chernykh A., Korolkov D., Nizhegorodtsev D., Kazakevich T., Mamedov S. Estimating the residual operating life of wooden structures in high humidity conditions // *Architecture and Engineering*. 2020. Vol. 5. No. 1. P. 10–19. <http://doi.org/10.23968/2500-0055-2020-5-1-10-19> EDN: LYBAZC
21. Иванов Ю.М., Славик Ю.Ю. Оценка длительной прочности древесины при изгибе по результатам кратковременных испытаний // *ИБУЗ. Лесной журнал*. 1981. № 2. С. 66–70. <https://lesnoizhurnal.ru/apxiv/1981/%E2%84%962-1981.pdf>
22. Белянкин Ф.П. Длительное сопротивление дерева. Москва, Ленинград : ОНТИ, 1934. 40 с. URL: <https://djuv.online/file/ElrD5VAqf2tv1> (дата обращения: 15.02.2025).
23. Sindhu T.N., Atangana A., Riaz M.B., Abushal T.A. Bivariate entropy-transformed Weibull distribution for modelling bivariate system-simulated data from a computer series: Mathematical features and applied results // *Alexandria Engineering Journal*. 2025. Vol. 117. P. 593–608. <http://doi.org/10.1016/j.aej.2024.12.107>
24. Рощина С.И. Теоретические исследования армированных деревянных конструкций с учетом длительных силовых воздействий // *Промышленное и гражданское строительство*. 2008. № 1. С. 48–49. EDN: IJBHCR
25. Шецукова Н.В. Реологическое поведение древесины при длительном нагружении // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2008. № 184. С. 180–185.
26. Hung K.-C., Wu T.-L., Chen Y.-L., Wu J.-H. Assessing the effect of wood acetylation on mechanical properties and extended creep behavior of wood/recycled-polypropylene composites. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 108. P. 139–145. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.039>
27. Никитина Т.А. Технический ресурс ретродревеси хвойных пород в элементах деревянных конструкций : дис. ... канд. техн. наук. 2021. 146 с. EDN: RQLTBR