

УДК 699.841

*Макарычев К.В.,
старший преподаватель
кафедры «Строительных конструкций, оснований и фундаментов им.
профессора Ю.М. Борисова»*

Воронежский государственный технический университет

Россия, г. Воронеж

Джумакулиева М.М.,

студент магистратуры

2 курс, институт международного образования,

Воронежский государственный технический университет

Россия, г. Воронеж

Хошимова Ф.Ф.,

студент магистратуры

2 курс, факультет «строительный»,

Воронежский государственный технический университет

Россия, г. Воронеж

Лукьянович Т.В.,

студент магистратуры

2 курс, факультет «строительный»,

Воронежский государственный технический университет

Россия, г. Воронеж

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ И
ДЕФОРМАЦИИ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ
СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

Аннотация: Древесина - единственный возобновляемый строительный материал, однако строительство зданий и сооружений в России ведется

преимущественно с использованием железобетонных, стальных и каменных материалов. В данной статье рассмотрено теоретическое исследование прочности и деформации деревянных конструкций при сейсмических воздействиях. Меры по защите деревянных конструкций от сейсмического воздействия. Пример расчёта сейсмических нагрузок и параметров нагружения на мостовой цельный дерево-армированную балку.

Ключевые слова: работоспособность, грунт, деревянные конструкции, несущая способность, прочность, деформативность, сейсмическое воздействие.

Makarychev K.V.,

senior lecturer

***Department of " Building structures, Foundations and Foundations named
after Professor Yu. M. Borisov»***

Voronezh state technical University

Russia, Voronezh

Jumagulyyeva M.M.,

master's degree student

Voronezh state technical University

Russia, Voronezh

Hoshimova F.F.

master's degree student

Voronezh state technical University

Russia, Voronezh

Lukyanovich T.V.

master's degree student

Voronezh state technical University

Russia, Voronezh

THEORETICAL STUDY OF THE STRENGTH AND DEFORMATION OF WOODEN STRUCTURES UNDER SEISMIC INFLUENCES

***Annotation:** Wood is the only renewable building material, but the construction of buildings and structures in Russia is carried out mainly using reinforced concrete, steel and stone materials. In this article, the theoretical study of the strength and deformation of wooden structures under seismic influences is considered. Measures for the protection of wooden structures against seismic impact. Example of calculation of seismic loads and loading parameters on a solid wood-reinforced beam bridge.*

***Key words:** working capacity, soil, wooden structures, load-bearing capacity, strength, deformability, seismic impact.*

Сейсмическим воздействием называется колебательное движение грунта в основании здания или сооружения, вызванное природными и техногенными факторами, которые в свою очередь приводят к деформациям и разрушениям самого здания или сооружения. Чтобы гарантировать полную безопасность при проектировании и возведении здания и сооружения необходимо учитывать сейсмичность самих строительных конструкций. А использование древесины для строительства является одним из актуальных и эффективных тем для реализации в целом. В связи с этим вопрос обеспечения сейсмичности деревянных конструкций приобретает народнохозяйственное значение.

Однако, анализ последствий сейсмического воздействия на деревянные конструкции показывает, что в них могут возникать серьёзные повреждения, например, в узловых соединениях, снижение качества, нарушение формы и фактических размеров в процессе эксплуатации под воздействием нагрузок,

либо дефекты в плане смещения основания, что грозит перекосом несущих элементов.

Цель работы заключается в исследовании прочности и деформативности деревянных конструкций в сейсмических районах.

Научная новизна работы заключается в определено теоретически сейсмическом воздействии на строительные конструкции из дерева. Одновременно впервые получены данные по прочности и деформативности деревянных элементов.

Способность деревянных конструкций сопротивляться разрушению под действием внешних нагрузок и есть его прочность, которая в свою очередь зависит от прочности составляющих его элементов (досок, брёвен, брусьев). Изменение формы и размеров материалов под действием внешних сил (нагрузки, влажности, температуры) называется деформативностью[1,7].

На прочность и деформативность древесины влияют повреждения и дефекты. Под дефектами строительных конструкций подразумевают несоответствие их стандартам, техническим условиям, нормам проектирования[1]. Дефекты, которые вызваны внешним воздействием (механическим, тепловым) обычно называют повреждениями конструкции. Особое внимание при инженерном обследовании деревянных конструкций обращается на следующие дефекты и повреждения, приведенные в схеме (рисунок 1)[7].



Рисунок. 1 Дефекты и повреждения деревянных конструкций

Горизонтально расположенная деревянная балка воспринимает не только поперечную весовую нагрузку, но и в случаях сейсмического воздействия учитывает влияние и вероятных горизонтальных поперечных сил[2].

Конструкции деревянных зданий, предусмотренные для возведения в сейсмически активных районах, проектируются и возводятся с различными остовами, которые включают в себя: каркасный, брусчатый и бревенчатый, панельный.

В зданиях с жесткими каркасными и панельными конструкциями сейсмическую нагрузку воспринимают вертикальные и горизонтальные части каркаса вместе с раскосами и обшивками. Расстояние между стойками принимается с постоянным шагом не больше 3 м. При этом каждая стойка крепится к фундаменту при помощи анкерных и металлических связей с соответствующими им стойками по верхней отметке здания и с элементами горизонтальных обвязок в уровне конструкций перекрытий. Деревянные перекрытия каркасных зданий осуществляются с использованием балок, производимых из сплошных или клеёных деревянных брусев, имеющих поперечное сечение в виде круглых или окантованных бревен. Перекрытия панельных зданий исполняются из панелей или отдельных балок. В уровне

перекрытий каркасных и панельных зданий по всем несущим стенам создаются непрерывные обвязочные пояса. Конструктивные элементы обвязочных балок-поясов соединяются друг с другом по всему контуру, вместе с угловыми стыками металлических накладок 123 на болтах или стяжек. Каждая из балок перекрытия крепится металлическими связями с балками примыкающего участка перекрытия и горизонтальными обвязками по контуру стен здания[2,3].

При анализе состояния деревянных зданий при сильных землетрясениях, можно однозначно сказать, что данные конструкции обладают достаточно высокой сейсмостойкостью, несмотря на недостатки. Одним из ярких примеров является поведение японских пагод, который относится к 9 балльному сейсмическому району. Конструктивное решение этих пагод предусматривает наличие гибких элементов, причем центральная колонна либо подвешена к потолку, либо крепится к основанию или к перекрытию, работая подобно маятнику. Также, примером может служить состояние щитовых домов после землетрясения в Сан-Фернандо (США), что доказывает практичность и прочность деревянных зданий. Но несмотря на это, у них есть свои недостатки, которые требуют принятия определенных мер для улучшения сейсмостойкости. Меры по защите деревянных конструкций от сейсмического воздействия представлены на рисунке 2[5].



Рисунок.2 Меры по защите деревянных конструкций от сейсмического воздействия

Усталостные характеристики материала определяются тремя переменными величинами: средним напряжением (τ_{cp}), амплитудой напряжений (τ_a) и числом циклов (n) до разрушения. Усталостные данные могут быть выражены в математической форме:

$$\tau_a = f(\tau_{cp}, n) \quad (1)$$

При этом формула должна удовлетворять определенным условиям, например, сумма среднего напряжения и амплитуда никогда не может превосходить разрушающего напряжения при статическом нагружении.

Важным фактором, характеризующим процесс экспериментального определения предела выносливости образцов, является выбор базы испытаний. При изучении циклической прочности материалов принимаются различные базы испытаний и испытаниях деревянных, каменных и железобетонных элементов на выносливость обычно принимают базу $n_0 = 2 \cdot 10^6$ циклов повторных нагружений, что в большинстве случаев отвечает реальному числу нагружений строительных конструкций при эксплуатации.

Оценку динамической прочности и выносливости при колебаниях выполняют после статических расчетов и выбора сечений элементов[9]. При расчетах на выносливость нормативная временная вертикальная нагрузка от подвижного состава железных дорог должна приниматься в виде ЕСК, где $K = 14$ - показатель класса нагрузки для капитальных мостов, $\varepsilon \leq 1$ - коэффициент, учитывающий наличие в поездах только перспективных локомотивов и вагонов. Нормативное давление на ось вагонов при классе $K=14$ составляет:

$$P'' = 24,5 \cdot K, \quad (2)$$

Отсюда, $P'' = 24,5 \cdot 14 = 343 \text{ кН}$

Расчетное вертикальное давление на колесо одиночной оси равно

$$P_k = \frac{P''}{2} \cdot K_d \cdot \gamma_f, \quad (3)$$

где: P'' - нормативное давление на ось вагонов при классе $K = 14$,

$$P'' = 343 \text{ кН};$$

K_d - динамический коэффициент для деревянных элементов железнодорожных мостов, $K_d = 1,07$;

γ_f - коэффициент надежности по нагрузке в расчетах на выносливость,

$$\gamma_f = 1.$$

Следовательно,

$$P_k = \frac{342}{2} \cdot 1,07 \cdot 1 = 183,5 \text{ кН}.$$

Величины максимального и минимального давлений, передаваемых через рельс на мостовой брус, зависят от степени жесткости рельса и податливости брусьев. Для учета передачи и распределения местного давления на поперечины рельсами определяем коэффициент упругого распределения нагрузки γ (коэффициент относительной жесткости). Из условия равенства прогибов в местах пересечения рельса и мостового бруса:

$$\gamma = \frac{a^3 \cdot E_s \cdot Y_s \cdot K}{E_p \cdot Y_p \cdot c^2 \cdot (3 \cdot l - 4c)} \quad (4)$$

где: a - шаг брусьев, из условия расстояния в свету 100-150 мм между мостовыми балками с типоразмерами шириной 200 мм и высоты 240

$$a_{\min} = 275 \text{ мм}, a_{\max} = 325 \text{ мм};$$

$$Y_{np} = 6070 \text{ см}^4, E_s = 10^5 \text{ кгс/см}^2 \text{ для мостового брусья};$$

$$Y_p = 3548 \text{ см}^4, E_p = 2,1 \cdot 10^6 \text{ кгс/см}^2 \text{ для рельса Р-65};$$

K_y - расчетный коэффициент приведенного момента инерции мостового бруса;

c - расстояние от оси рельса до опоры бруса, $c = 200$ мм;

l - пролет бруса, $l = 3250$ мм.

Так как в случаях расстановки составных мостовых брусьев с минимальным и максимальным шагом $\gamma < 1/3$, давление колеса

распределяется на пять брусьев, максимальное давление на брус от одного колеса составляет[8]:

$$P_{k \max} = P_{1k} = \frac{1+18\gamma+7\gamma^2}{5+34\gamma+7\gamma^2} \cdot P_k \quad (5)$$

Минимальное давление на брус от одного колеса составляет:

$$P_{k \min} = P_{3k} = \frac{1-3 \cdot \gamma}{5+34 \cdot \gamma+7\gamma^2} \cdot P_k \quad (6)$$

Результаты вычислений сведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры нагрузок на мостовой цельный брус при сечении 200 x 240 мм

Шаг составного мостового бруса вдоль пролетного строения, мм	γ	Максимальное давление колеса на брус P_{\max} , кН	Минимальное давление колеса на брус P_{\min} , кН
$a_{\min} = 275$	0,0028	32,38	8,20
$a_{\max} = 325$	0.0034	35,70	4,43

Таким образом, максимальная нагрузка цикла при испытаниях на выносливость, соответствующая давлению одного колеса для бруса 200 x 240 мм с шагом до 325 мм, составляет около 36 кН. При шаге брусьев более 325 мм распределение давления будет на три бруса, и максимальная нагрузка цикла может достигать величины 40 кН, соответствующей расчетной статистической нагрузке для конструирования и проверок достаточности количества связей сдвига, условий прочности и жесткости составных мостовых брусьев[10].

Эксплуатационную характеристику частоты нагружения составных мостовых брусьев можно определять с учетом геометрических параметров вагонной нагрузки и скорости ее движения по мостовому переходу. При движении по пролетному строению моста поездов, составленных из однотипных вагонов, происходит пульсация статических прогибов поперечных мостовых брусьев, называемая кинетическим возбуждением. Она определяется тем обстоятельством, что, поскольку вагонная нагрузка

сосредоточена в местах расположения свай, то всегда можно найти два ее положения, дающие наибольший и наименьший прогибы мостовых брусьев. Прогибы будут периодически повторяться. Период повторения равен:

$$T = 2 \cdot \pi / p, \quad (7.1)$$

или

$$T = B / v, \quad (7.2)$$

Откуда,

$$p = 2 \cdot \pi = v / B, \quad (7.3)$$

где, V - скорость движения, м/сек;

B - расстояние между осями вагона, м;

p - круговая частота нагрузки, представляющая собой число колебаний в $2 \cdot \pi$ сек, 1/сек.

Частота нагружения равна $\nu = 1/T$, Гц.

По значениям V и B составляем таблицу эксплуатационных частот нагружения мостовых брусьев (табл. 2)[10].

Таблица 2

Параметры эксплуатационной частоты нагружения цельных мостовых брусьев

Расстояние, м	ν / p , 1/сек, при скорости движения грузовых поездов, км/ч (м/сек)			
	40(11,1)	60(16,7)	90(25,0)*	160(44,4)**
1,5 (между осями)	7/47	11/70	17/105	29/186
2,8 (между парами осей)	3/18	4/28	7/41	12/73
2,0 (между осями соседних вагонов)	6/35	8/52	13/79	22/139

Таким образом, эксплуатационное число нагружений дерево армированных мостовых брусьев за 1 сек находится в пределах 3-29 (180-1740 цикл/мин).

В данной работе определение расчетных параметров колебаний преследует цель оценки опасности резонансных и близких к ним колебаний при испытаниях составных мостовых брусьев на выносливость. Частоты динамических нагрузок от подвижного состава таковы, что резонансные колебания возможны лишь на собственных частотах, соответствующих низким собственным формам (симметричной и первой кососимметричной). Частоты собственных поперечных колебаний балок постоянного сечения на двух опорах определяются по формуле[4]:

$$\lambda_i = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{\alpha_i^2}{l^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I}{m}}, \quad (8)$$

где: α - характеристические числа (корни частотного уравнения), в данном случае кратные;

m - погонная масса составного мостового бруса,

$$m = 0,1 \cdot 0,25 \cdot 2 \cdot 600/2 = 15 \text{ кг},$$

$$m = 0,15 \text{ кг/см};$$

l - расчетный пролет бруса, $l = 2 \text{ м};$

$E \cdot I$ - жесткость, вычисленная по экспериментальным прогибам, полученным во время испытаний из уравнения изогнутой оси с учетом коэффициента приведения по жесткости;

$$E_{cp} = 87300 \text{ кгс/см}^2 ; \quad I = (b \cdot h^3/12) \cdot K_y$$

$$K_y = 0,5, \text{ тогда } I_{пр} = 6070 \text{ см}^4 .$$

Первая частота собственных колебаний составляет $\lambda_1 = 2,4 \text{ Гц}$ (144 цикл/мин). Необходимо отметить, что априорные оценки собственных и вынужденных колебаний весьма затруднительны, так как исходные данные (расчетная схема, нагрузки и особенно жесткости элементов и соединений) могут быть заданы со сравнительно невысокой точностью. В то же время

результаты расчета на гармоничные нагрузки при резонансе или вблизи резонанса очень чувствительны к малейшим изменениям характера рассчитываемой динамической системы, включающей испытываемый элемент, опоры, траверсы и другие силовые устройства пульсатора. Даже небольшие изменения собственной частоты могут во много раз увеличить или уменьшить амплитуды колебаний, особенно при малых значениях коэффициентов неупругого сопротивления γ , характерных для деревянных элементов[6].

В первом приближении погрешности в определении собственных частот мостовых брусьев учитывают введением резонансных зон, границы которых вычисляем по формуле:

$$0,85 \cdot \lambda_1 = 2,04 \text{ Гц} \leq \alpha_1 \leq 1,15$$

$$\lambda_1 = 2,8 \text{ Гц} \quad (9)$$

При проектировании в соответствующих случаях рекомендуется учитывать поражающие факторы землетрясений в виде сейсмических нагрузок (табл. 3), перемещений грунта, изменения прочности, устойчивости и жесткости конструкций (грунта основания).

Таблица 3

Поражающие факторы землетрясения

№	Воздействие сейсмических нагрузок и воздействий
1	Силы инерции от масс сооружения и подвижного состава
2	Сейсмическое давление грунта насыпей подходов на устои
3	Сейсмическое давление воды и разжиженного грунта на речные опоры
4	Сейсмическое давление грунта покровных отложений на фундаменты опор глубокого заложения
5	Нагрузки от ударов смежных конструкций

В настоящий момент в мире происходит стремительное развитие технологий и материалов в многоэтажном строительстве на основе древесины. В России же использование древесины в жилищном строительстве

не распространено, тем более отсутствует деревянное многоэтажное строительство. В виду жестких ограничений предельной высоты деревянных зданий, а также существующий ограничений по пожарным нормативам. В настоящий момент многие страны меняют свой подход, учитывая существующий прогресс в технологиях деревянного строительства.

Данное проведенное исследование позволило сделать вывод о том, что деревянные конструкции обладают достаточно высокой сейсмостойкостью при сильных землетрясениях. Следовательно, зная сейсмическую нагрузку, район строительства, применяя необходимые меры по защите деревянных конструкций от сейсмического воздействия целесообразно применение деревянных конструкций в сейсмических зонах

Использованные источники:

1. Грибанов А.С. Прочность и деформативность деревянных балок, армированных композитными материалами с локальной модификацией древесины сжатой зоны: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01- ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук», 2018. 200 с.

2. Иванова Ж.В. Исследование сейсмостойкости каркасных деревянных зданий с учетом нелинейно-упругих и диссипативных свойств материала элементов: дис. канд. техн. наук. – СПб.: ПГУПС, 2000. 217 с.

3. Иванова Ж.В. Обеспечение надежности и безопасности деревянных зданий, применяемых для строительства в сейсмоактивных районах // Известия Петербургского Университета Путей Сообщения. 2005. № 3. С. 23 – 28.

4. Международный стандарт: ИСО 3010 (Второе издание – 01.12.2001г.) Основы расчета конструкций –сейсмические воздействия на конструкции, 01.12.2001г. 01.12.2001г. 54 с.

5. Мустакимов В.Р. Проектирование сейсмостойких зданий: учеб. пособие. Казань: Издательство КГАСУ, 2016. 343 с.
6. Свод правил: СП 14.13330.2018 Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81* (с Изменением N 1): нормативно-технический материал. – Москва: 2018.
7. Селезнев В., Роговая М. Самое прочное здание — это деревянный дом из лиственницы [Электронный ресурс]: терминологический словарь. – / Селезнев В., Роговая М. – Электронные данные. – Новосибирск: Газета.Ru, 2011. – URL: https://www.gazeta.ru/science/2011/03/22_a_3561345.shtml.
8. Стоянов В.О. Прочность и деформативность изгибаемых деревянных элементов, усиленных полимерными композитами: дис. канд. наук: ВАК РФ 05.23.01: защищена 03.10.18: утв. 03.10.18. Москва, 2018. 186 с.
9. Хачиян Э.Е. Сейсмические воздействия и прогноз поведения сооружения. Ереван: Гитутюн, 2015. 555 с.
10. Хошимова Ф.Ф., Бойматов Ф.Б. Прочность и деформативность деревянных мостовых брусьев, армированных углеродным волокном// ФГБОУ ВО «Воронежский Государственный Технический Университет». 2020. - № 1 (12). С. 73-78.