

Устойчивость деревянных стержней в составе конструкций

Дубраков Сергей Валерьевич

Магистрант

Юго-Западный государственный университет

1.Обоснования научно-исследовательской работы

Аннотация.

Работа посвящена исследованию устойчивости деревянных стержней сплошного сечения с учетом длительности нагружения и влияния температурно-влажностного состояния древесины.

Ключевые слова:

- деревянные конструкции;
- потеря устойчивости;
- элемент.

Актуальность работы.

Современные нормы проектирования деревянных конструкций разработаны в 50-х годах прошлого столетия и с тех пор принципиальных изменений не претерпели. Используемые расчетные модели не отражают реальной работы конструкций. Это касается работы стержней, как при изгибе, сжатии с изгибом и центральном сжатии.

Если рассматривать вопросы расчета отдельных элементов на сжатие, то СП 64.13330.2011 ограничивает гибкости этих стержней, но допускает значительные гибкости при изгибе из плоскости конструкций (например арки и рамы).

Существующий способ оценки устойчивости по СП не учитывает ряд факторов, которые могут существенно повлиять на результаты расчета.

Во-первых, отношение $E_x/R_c = 300$, что характерно для влажности древесины около 12%. Разброс значений E_x/R_c более широк – от 210 до 450 [Родин Б.Е.] при кратковременном нагружении и от 180 до 370 при длительном нагружении [Иванов А.М.].

Во-вторых, при длительном нагружении, $\sigma_{кр}$, а следовательно и гибкость λ зависят от времени [Дроздова Л.П., Каган М.Е.].

В-третьих, значение коэффициента, учитывающего влияние длительности нагружения, согласно СП 64.13330.2011, $m_{дл} = 0,66$ принято за базисное.

Работа стержней в составе конструкции отличается от работы отдельных стержней, что обусловлено как закреплением их в узлах, податливостью узловых элементов, а так же различной деформативностью древесины под углом к действующему усилию.

Необходимость таких исследований связана с разработкой конструктивных решений обладающих меньшей материалоемкостью, что достаточно актуально в настоящее время.

Цель и задачи работы.

Целью работы является исследование устойчивости деревянных стержней, как отдельных элементов, так и в составе конструкции.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Определены механические и деформационные характеристики образцов древесины при сжатии;
2. Исследованы на устойчивость отдельные элементы гибкостью $\lambda=150$, $\lambda=175$ и $\lambda=200$;
3. Проведены испытания модели брусчатой фермы при статическом нагружении кратковременной нагрузкой.

Объект исследования:

- стержней гибкостью $\lambda=150$, $\lambda=175$ и $\lambda=200$;
- модель стержневой конструкции.

Предмет исследования: усилие, деформации, прогибы в элементах работающих на сжатие при статическом кратковременном и длительном нагружении.

Научная гипотеза.

На характер НДС влияют различные факторы, основным из которых является анизотропия механических и деформативных свойств. На распределение нормальных напряжений влияют касательные напряжения, а на величину касательных напряжений влияют нормальные напряжения. Это требует новых подходов к оценке их НДС и выработке критериев прочности.

Предполагаемые методы и подходы.

Экспериментально-теоретические, основанные на законах механики деформируемого твердого тела с учетом анизотропии механических свойств древесины.

Ожидаемые результаты.

Практические методы расчета, графики и зависимости элементов большой гибкости для стержневых конструкций.

Теоретическое значение работы.

Получение новых знаний в области устойчивости стержней из древесины с учётом влажности, длительности нагружения и при работе в составе конструкции.

Практическое значение работы.

1) Разработка методики расчета деревянных стержней с учетом длительности их нагружения в разных температурно-влажностных условиях эксплуатации.

2) Оценка НДС деревянных сжатых элементов при проведении обследований строительных конструкций.

2. Экспериментальное исследование брусчатой фермы.

2.1. Методика проведения эксперимента

Для экспериментальных исследований была принята деревянная ферма из элементов прямоугольного сечения. Генеральные размеры фермы представлены на рис. 1, а детали на рис. 2.

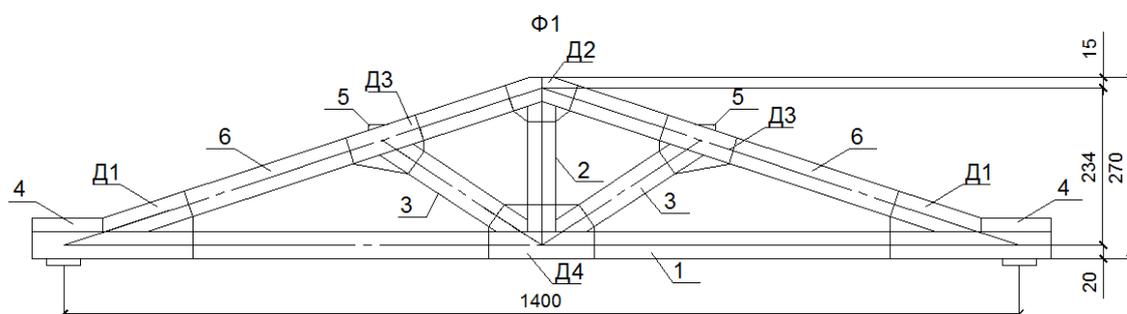


Рис. 1. Конструкция фермы.

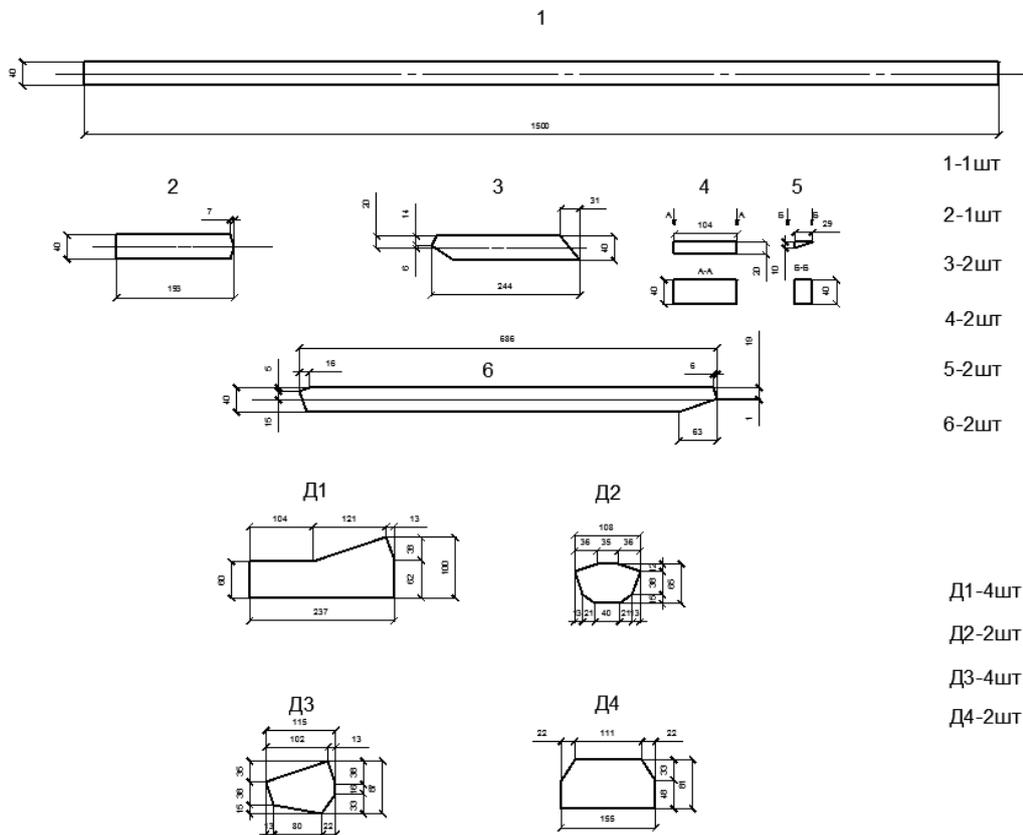


Рис 2. Детали фермы.

Узлы фермы шарнирно-врезные и шарнирно-премыкающие. Соединение элементов фермы выполнены из фанерных накладок (фанера толщиной 6 мм) на нагелях (болтовое соединение $\varnothing 3,8$ мм, гвозди $\varnothing 2,09$ мм $l=40$ мм).

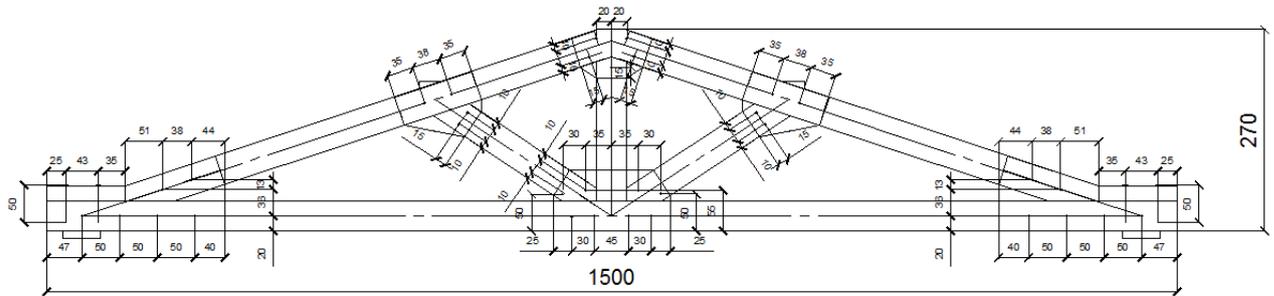


Рис. 3. Схема расположения нагелей.

Несущая способность узловых соединений определяется по формулам СП 64.13330.2011:

а) для основного нагеля:

-из условия смятия средних элементов

$$T_1 = 50cd = 50 \times 4 \times 0.38 = 76 \text{ кг}; \quad (1)$$

-из условия смятия крайнего элемента

$$T_2 = 80ad = 80 \times 0.6 \times 0.38 = 18.34 \text{ кг} \quad (2)$$

-из условия изгиба нагеля

$$T_3' = 180d^2 + 2a^2 = 180 \times 0.38^2 + 2 \times 0.6^2 = 26.71 \text{ кг} \quad (3)$$

$$T_3'' = 250d^2 = 250 \times 0.38^2 + 2 \times 0.6^2 = 36.1 \text{ кг} \quad (4)$$

Принимаем минимальное $T_{из}$ перечисленных – $T_2=18,34$ кг.

б) для нагельного соединения

- длительные

$$[T]_{дл} = nm_{ср} T_{min} = 2 \times 2 \times 18.34 = 72.96 \text{ кг} \quad (5)$$

- кратковременные

$$[T]_{кр} = \frac{T_{дл}}{m_{дл}} = \frac{72.96}{0.66} = 110.55 \text{ кг} \quad (6)$$

где $m_{дл}=0,66$ – коэффициент длительной прочности.

Для оценки деформации в сечениях элементов были приклеены тензорезисторы с сопротивлением $R=100\pm 0.1\text{ Ом}$ клеем БФ-6. Схема наклейки тензорезисторов показана на рис. 4.

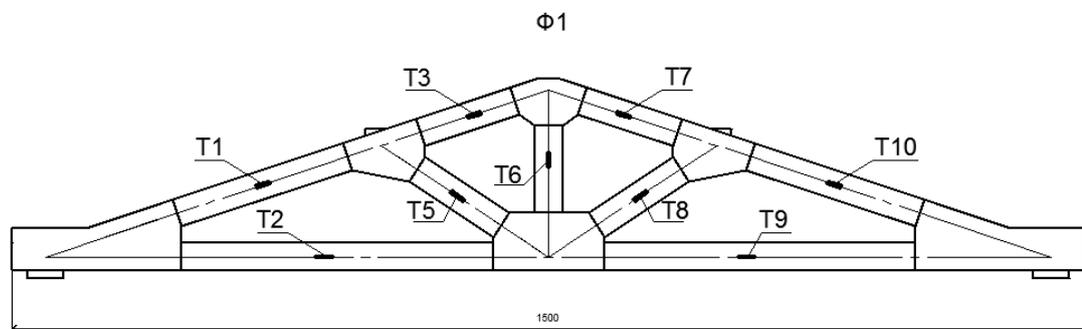


Рис. 4. Схема наклейки тензорезисторов.

Деформации измерили с использованием автоматического измерителя деформации АИД-4 (см. рис. 5).



Рис. 5. Измерительная аппаратура.

Схема приложения нагрузки показана на рис. 6.

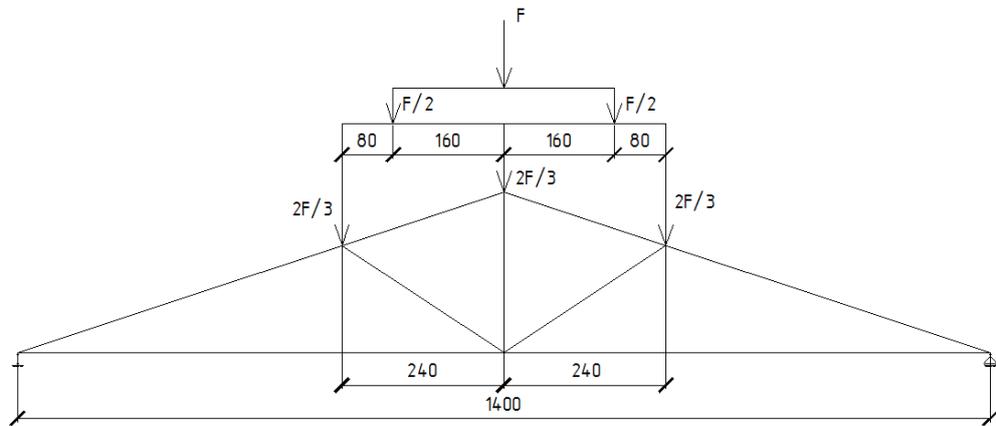


Рис. 6. Схема приложения нагрузки.

Вид установки для испытания конструкции показан на рис. 7.

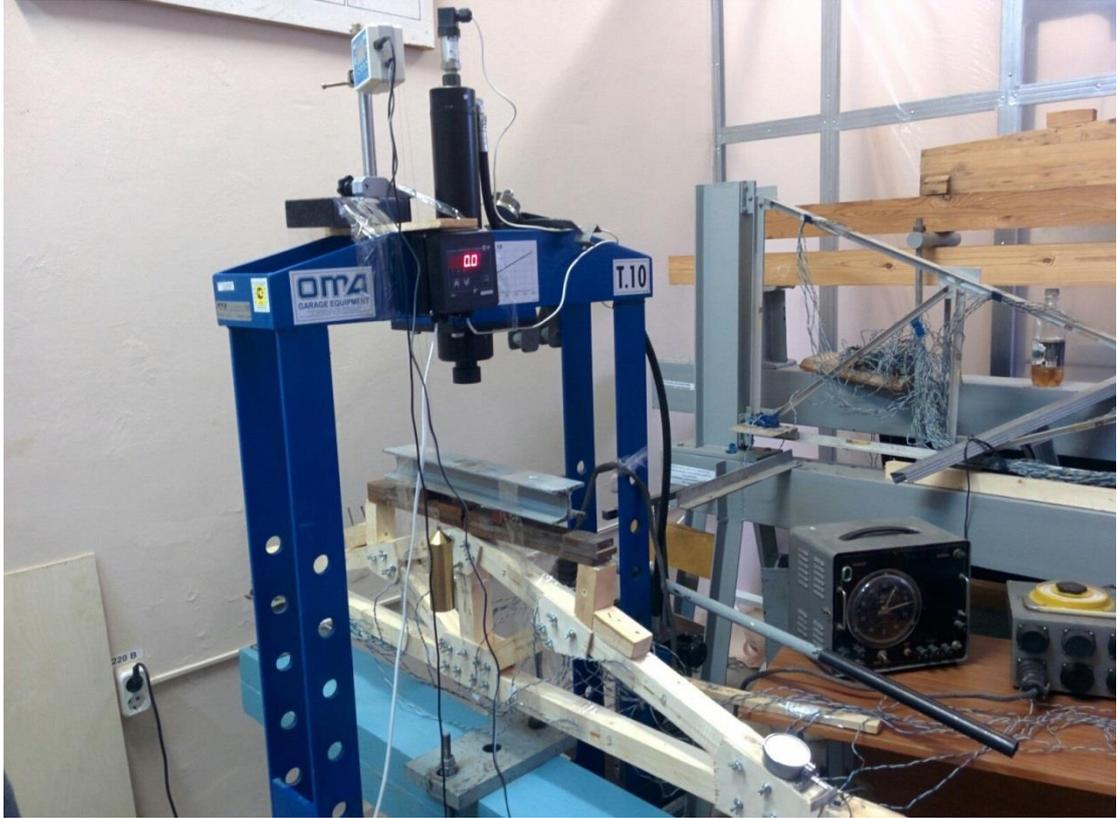
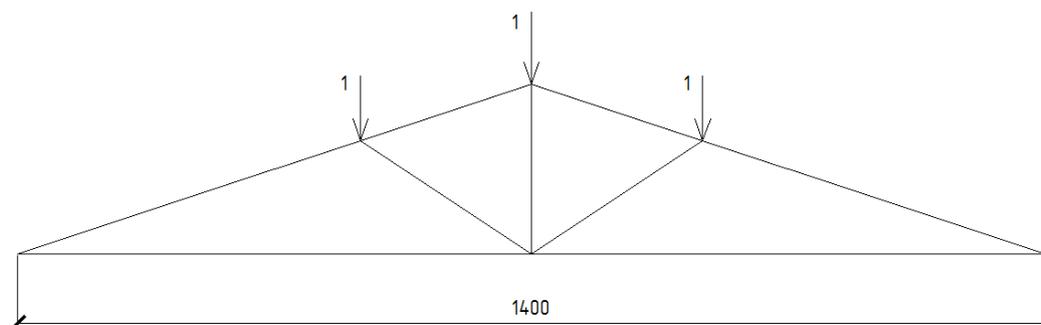


Рис. 7. Установка для испытаний с испытываемой фермой.

2.2. Результаты экспериментальных исследований.

Перед проведением эксперимента были определены усилия в элементах фермы от нагрузки.

а)



б)

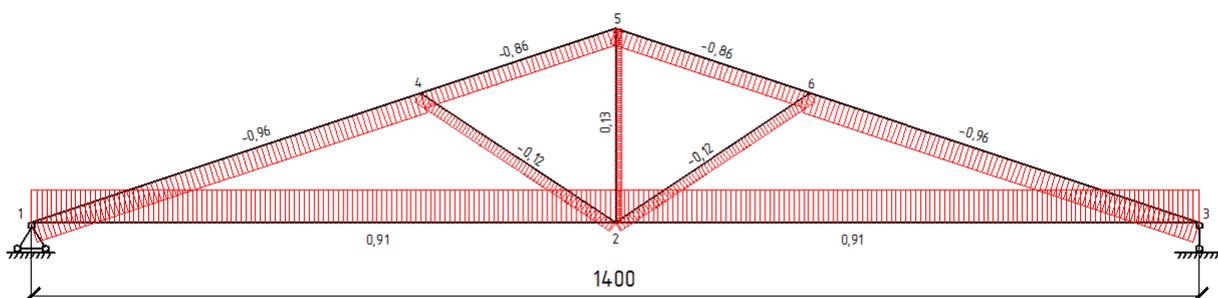


Рис. 8. К оценке усилий от единичных нагрузок: а) схема нагружения; б) усилия в элементах.

Принимаем линейное увеличение усилий от единичной нагрузки. Поэтому перерасчет усилий от единичной к испытательной устанавливается путем умножения единичной на отношение - $N_{\text{исп}}/N_{\text{ед}}$.

Напряжения в элементах устанавливается по формуле:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E , \quad (7)$$

где E – модуль упругости материала.

Модуль упругости определяли путем испытания стандартных образцов на сжатие (см. рис. 9).

а)



б)



Рис.9. Образцы для испытаний на сжатие: а) до разрушения; б) после разрушения.

Зависимость $\sigma = f(\varepsilon)$ представлена на рис. 10.

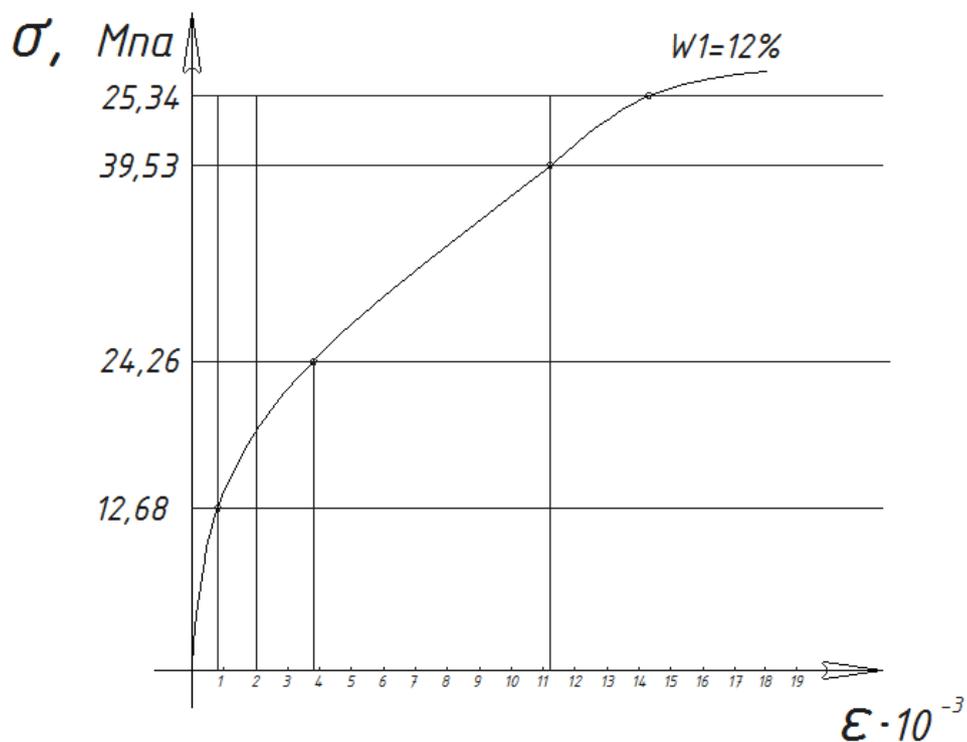


Рис. 10. Диаграмма деформирования образцов.

Модуль упругости в пределах пропорциональной работы (до 12,68 МПа) составляет 12,68 ГПа, от 12,68 МПа до 24,26 МПа – $E_x=6,56$ ГПа от 24,26 МПа до 39,53 МПа – $E_x=3,59$ ГПа.

Для определения устойчивости отдельных элементов были изготовлены образцы сечением 30x10 длиной 43,3 см, 50,5 см, 57,7 см с соответствующими гибкостями 150, 175, 200 (см рис. 11)/

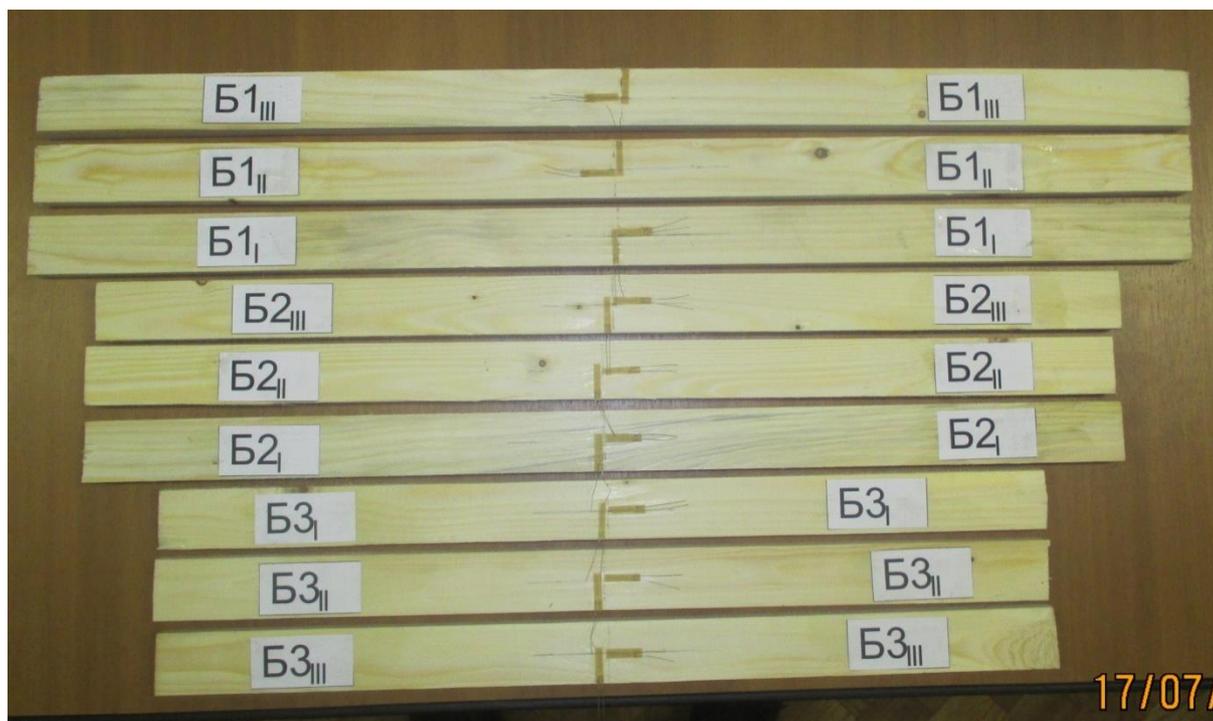


Рис. 11. Образцы для исследования устойчивости.

Критическая нагрузка по Эйлеру для этих стержней составляет следующие величины (при модуле упругости $E_x=12,68$ ГПа):

- длиной 43,3 см ($\lambda=150$) – 53,09 кг;
- длиной 50,5 см ($\lambda=175$) – 39,03 кг;
- длиной 57,7 см ($\lambda=200$) – 29,90 кг;

Испытания образцов на устойчивость при соблюдении шарнирного защемления образцов по концам показано на рисунке 12.



Рис. 12. Вид образца в установке для испытаний на сжатие.

Характер разрушения образцов показан на рис. 13.



Рис. 13. Характер разрушения образцов при испытаниях на устойчивость.

Деформации образцов фиксировали с помощью тензорезисторов, которые наклеивали в двух направлениях: вдоль и поперек действующего усилия. Результаты испытаний представлены в таблице 1 и на рис. 14-16.

Таблица 1. Результаты испытания на устойчивость.

Образец №	λ	L, см	Нагрузка, кН	Тензорезисторы $\epsilon \cdot 10^{-5}$				Разрушающая Нагрузка, кН
				№1	№2	№3	№4	
1	150	43,3	0	0	0	0	0	5,5
			1	-3	-8	12	-	
			3	-7	-32	26	-	
			5	-15	-73	54	-	
2	150	43,3	0	0	0	0	0	6,03
			2	58	-20	-85	39	
			3	75	-24	-105	55	
			4	99	-37	-115	69	
			5	184	-69	-168	100	
			6	272	-87	-266	123	
3	150	43,3	0	0	0	0	0	6,01
			1,73	52	-21	-58	8	
			3,00	75	-30	-105	15	
			4,43	122	-43	-145	18	
			5,11	248	-51	-164	19	
			5,74	340	-66	-222	22	
4	175	50,5	0	0	0	0	0	5,5
			2,53	13	-1	-57	5	
			4,35	8	-4	-90	7	
			4,98	23	-10	-107	14	
5	175	50,5	0	0	0	0	0	5,5
			1,3	-60	21	34	-10	
			2,5	-83	32	38	-6	
			5,33	-173	86	196	19	
6	175	50,5	0	0	0	0	0	5,25
			1	-	10	-44	-1	
			2	-	23	-79	2	
			4,18	-	50	-153	3	
			5	-	65	-188	3	
7	200	57,7	0	0	0	0	0	2,37
			1,10	-36	13	+38	-10	
			1,55	-68	27	+64	-25	
			1,90	-97	40	+89	-39	
			2,25	-210	85	+217	-83	

$\lambda=150$

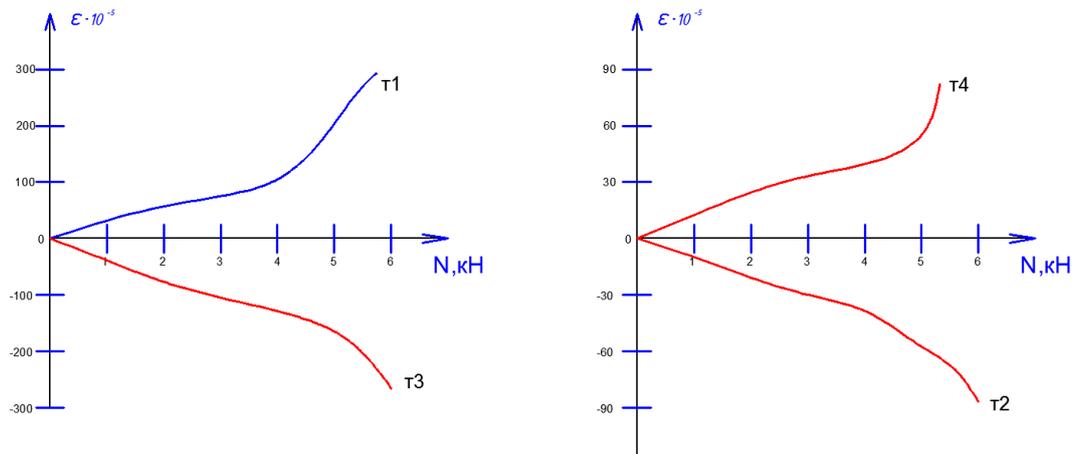


Рис.14. График деформирования образцов при испытаниях на устойчивость $\lambda=150$.

$\lambda=175$

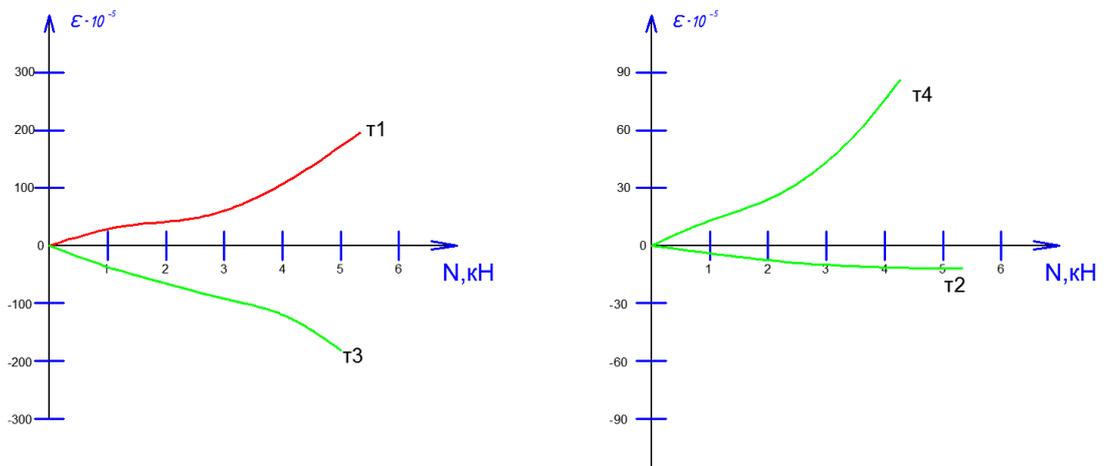


Рис 15. График деформирования образцов при испытаниях на устойчивость $\lambda=175$

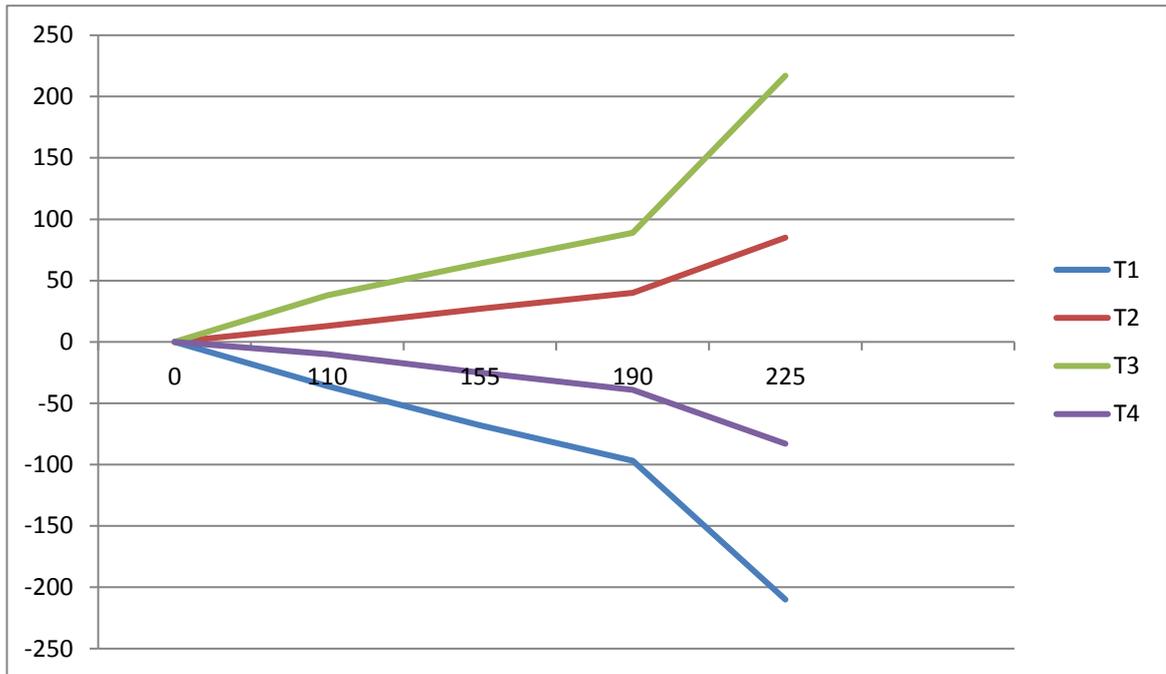


Рис. 16. График деформирования образцов при испытаниях на устойчивость $\lambda=200$.

Для исследований стержней в составе конструкции были проведены статические испытания фермы. Нагружение производили ступенями по 2,0 кН. На каждом этапе снимали отчет по показаниям тензорезисторов. Результаты испытаний представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты испытаний фермы.

Нагрузка, кг	Показания тензорезисторов								
	1	2	3	5	6	7	8	9	10
0	459	474	623	583	607	572	558	648	497
200	462	x	x	582	609	566	561	652	497
400	x	x	x	x	609	554	558	655	492
600	x	x	604	580	608	-	557	661	491
800	x	x	612	580	606	520	560	662	492
1000	x	x	612	581	605	513	559	662	492
2000	461	x	608	580	605	515	560	662	504
0	469	x	622	580	609	574	561	637	500
0 через 30 мин	472	802	618	576	605	566	556	638	502

Примечание: x-обозначены тензорезисторы, по которым измерение деформации не проводилось.

Величины деформирования в сечениях фермы приведены в таблице 3:

Таблица 3. Деформации в сечениях элементов фермы по этапам нагружения.

Нагрузка, кг	Деформации, $\epsilon \times 10^{-5}$								
	1	2	3	5	6	7	8	9	10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
200	3	x	x	-1	2	-6	3	4	0
400	x	x	x	x	2	-18	0	5	-5
600	x	x	-19	-3	1	x	-1	13	-6
800	x	x	-11	-3	-1	-52	2	14	-5
1000	x	x	-11	-2	-2	-59	1	14	-5
2000	2	x	-15	-3	-2	-57	2	14	7
0	10	x	-1	-3	2	2	3	-11	3
0 через 30 мин	13	28	-5	-7	-2	-6	-2	-10	5

Примечание: x-обозначены тензорезисторы, по которым измерение деформации не проводилось.

В результате эксперимента установлено, что разрушение при нагрузке 8,0 кН произошло в результате сдвига в узловых соединениях при усилии $N_{раз}=12,84$ кН. Превышение над теоретической несущей способностью в

узловом соединении составило 1.16 раза ($128,4/110,55=1,16$). Разрушающую нагрузку установили, исходя из предельной деформации в 2 мм, что принято для нагельных соединений в качестве критической величины. При нагрузке в 20 кН сдвиг в соединениях составил для правой опоры 5,52 мм, а для левой опоры 4,48 мм. Прогиб фермы в середине пролета составил 12,06 мм, что составляет 1/116 пролета.

Коэффициент надежности по результатам испытаний составил величину:

$$K=1.54(1.61-0.094\lg t_p)=2.13,$$

Где t_p – 240 сек., $\lg t_p=2,38$

Коэффициент устойчивости равен:

$$\varphi_{\text{эксп}} = \left(\frac{0,8 \cdot 59}{1 + 1,04^2/5} \right) \cdot \left(\frac{3,14}{23,4} \right)^2 \cdot (1 - 0,064 \cdot 2,38) = 0,59$$

Теоретический коэффициент устойчивости согласно СП 64.13330.2011 равен:

$$\varphi_{\text{теор}} = 1 - a \left(\frac{\lambda}{100} \right)^2 = 1 - 0,8 \left(\frac{23,4}{100} \right)^2 = 0,96$$

Значение разницы в коэффициентах устойчивости ($\approx 39\%$) говорит о необходимости корректировки формул в СП 64.13330.2011.

3. Заключение

В результате проведенных исследований образцов, элементов и модели брусчатой фермы получены данные о механических и деформационных характеристиках древесины, критических нагрузках потери устойчивости элементов.

Было установлено, что коэффициент φ , характеризующий переход элемента в предельное состояние (потеря устойчивости), зависит от отношения E_x/R_c .

Коэффициент устойчивости отдельных стержней оказался выше, чем в составе брусчатой фермы. Это говорит о том, что необходимо совершенствование методов расчета деревянных элементов на устойчивость.