

РАСЧЕТ ДЕРЕВЯННОЙ ФЕРМЫ ПРОЛОТОМ 18 МЕТРОВ НА ВИТЫХ КРЕСТООБРАЗНЫХ СТЕРЖНЯХ

Столповский Г.А., канд. техн. наук, доцент,
Докучаева В.А., Тарасова Е.И., Романюк П.В.
Оренбургский государственный университет

Всесторонний анализ эволюции развития способов сопряжения элементов деревянных конструкций позволяет сформулировать основные требования, которым должен обладать стержень, обеспечивающий сокращение трудозатрат при выполнении стыков в условиях строительной площадки:

- уменьшение количества соединительных стержней за счет повышения их несущей способности;
- внедрение в массив древесины без какой-либо предварительной расклевки отверстий;
- способность восприятия изгибающих и растягивающих усилий;
- возможность применения скоростных способов забивки.

Для реализации сформулированных требований был разработан новый тип стального соединительного стержня для сопряжения элементов деревянных конструкций при строительстве быстровозводимых зданий.

Стальной винтовой крестообразный стержень может иметь диаметр от 12 мм до 22 мм. Размеры диаметров приняты из условия конструирования узловых соединений деревянных конструкций, а также мощности применяемого инструмента.

Толщина ребер креста должна быть с одной стороны, минимальной для предотвращения раскалывания древесины, с другой стороны обеспечивать прочность и неизменяемость стержня при забивке.

При исследовании поставленных вопросов путем проведения пробных забивок рассматриваемые параметры варьировались в следующих пределах: шаг навивки – от $15d$ до $25d$, толщина ребер – от 1 до 4 мм. В результате проведенных опытов было выявлено, что независимо от способа забивки вышеприведенные условия будут выполнены при шаге навивки $20d$ и толщине ребра 2 мм в случае применения термически обработанной стали 40Х.



Рисунок 1 – Стальной витой крестообразный стержень

Использование стальных витых стержней крестообразного поперечного сечения является также актуальным для усиления и ремонта эксплуатируемых деревянных конструкций.

Таким образом, при увеличении нагрузок на перекрытие или покрытие наиболее часто возникает проблема в обеспечении требуемой прочности опорных и стыковочных узлов балки или фермы в связи с тем, что расчетное сопротивление древесины на смятие поперек волокон достаточно мало. Для решения данной задачи и для фиксации соединяемых элементов в проектном положении представляется эффективным применение соединительных элементов в виде витых крестообразных стержней. В известных решениях таких узлов, как правило, используют стяжные нагельные болты, которые требуют предварительной рассверловки отверстий, постановку шайб и гаек. Немаловажным является и тот факт, что стальные витые стержни полностью находятся в массиве древесины, не имеют выступающих деталей, что значительно повышает как огнестойкость соединения, так и его эстетичность.

За счет повышенной несущей способности крестообразных стержней в сравнении с известными типами шурупов и глухарей открывается возможность подвески достаточно тяжелых элементов, при этом достаточную степень несущей способности будет обеспечивать группа стержней, совместность работы которых можно обеспечить объединяющей опорной пластиной. Отметим, что при наличии в проектируемом узле нескольких стержней необходимо выполнить их соответствующую расстановку в направлении как вдоль волокон древесины (S_1), так и поперек волокон между стержнями (S_2) и между стержнем и кромкой деревянного элемента (S_3) по аналогии с болтовыми и нагельными соединениями.

В качестве примера произведем расчет соединения укрупнительного узла металлодеревянной фермы с применением витых стержней крестообразного поперечного сечения.

Пролет фермы $l=18$ м, шаг ферм $B=6$ м.

Материалы конструкций: для фермы – сосновые брусья второго сорта прямоугольного сечения с влажностью не более 15% и расчетными сопротивлениями $R_c = R_{cm} = 1,3$ кН/м²; $R_p = 0,8$ кН/м²; $R_{ск} = 0,24$ кН/м²; для накладок – сталь марки С235 с расчетными сопротивлениями: на растяжение – $R_y = 23$ кН/м²; на смятие – $R_{cm} = 47,5$ кН/м²; для стержней – сталь марки 40Х с $R_y = 78,5$ кН/м². Изготавливают фермы на строительной площадке.

Ферму рассчитываем на действие постоянной нагрузки (вес покрытия и собственный вес фермы) и нагрузки от снега. Нагрузкой от ветра вследствие малого уклона пренебрегаем.

Произведем статический расчет усилий в стержнях фермы с помощью программного комплекса APMStructure 3D.

Таблица 1 – Сбор нагрузок на ферму

Наименование нагрузки	Q_n , кгс/м ²	$\gamma\gamma_f$	Q , кгс/м ²
1	2	3	4
<i>Постоянная</i>			
Кровля в два слоя рубероида по пергамину на мастике	10	1,1	11
Обрешетка в два слоя из досок толщиной 19 и 16 мм $\left(\frac{0,019}{2} + 0,016\right) \cdot 500$	12,75	1,1	14
Утеплитель из минеральной ваты 0,08·250	20	1,2	24
Пароизоляция в один слой толя	2,5	1,2	3
Подшивка из досок толщиной 19 мм 0,019·500	9,5	1,1	10,45
Вес прогона сечением 10х25 через 1,5 м $\frac{0,10 \cdot 0,25 \cdot 500}{1,5}$	8,3	1,1	9,13
Итого (постоянная)	61		72
<i>Временная</i>			
Снеговая	100	1,4	140
Итого (полная)	163		212

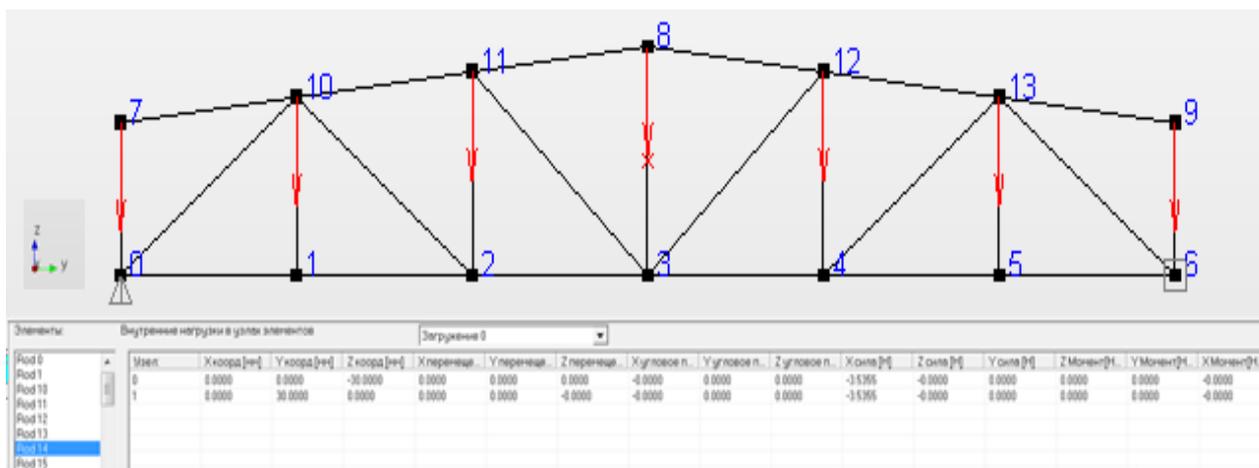


Рисунок 2 – Расчетная схема фермы при построении в программном комплексе

Расчет фермы производится при загрузке фермы полной расчетной нагрузкой, а также при загрузке фермы постоянной нагрузкой на всем пролете и снеговой нагрузкой на половине пролета.

Таблица 2 – Усилия в стрелках фермы

Элементы фермы	№ стержня	Усилия, кН							
		От постоянной нагрузки	от снега			расчетные усилия		усилие, по которому подбирается сечение	Сечение элемента, см
			слева	справа	на всем пролете	на растяжение	на сжатие		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Верхний пояс	3-а	0	0	0	0	0	0	224,4	18x22
	4-г	-94	-78,6	-51	-129,6	-	223,6		
	5-е	-94	-65,2	-65,2	-130,4	-	224,4		
	5'-	-94	-65,2	-65,2	-130,4	-	224,4		
	4'-и	-94	-78,6	-78,6	-129,6	-	223,6		
	3'-м	0	0	0	0	0	0		
Нижний пояс	1-б	66,2	65,2	29	94,2	160,4	-	221,4	16x22
	1-в	66,2	65,2	29	94,2	160,4	-		
	1-д	93,2	78,6	49,6	128,2	221,4	-		
	1-з	93,2	49	78,6	128,2	221,4	-		
	1-к	66,2	29	65,2	94,2	160,4	-		
	1-л	66,2	29	65,2	94,2	160,4	-		
Раскосы	а-б	-82	-78,6	-34	-112,6	-	194,6	194,6	16x22
	в-г	33,6	18,2	23,5	41,7	73,5	-	18,2	12x16
	д-е	0	-18,2	18,2	0	18,2	18,2	18,2	12x16
	ж-з	0	18,2	-18,2	0	18,2	18,2	-	16x22
	и-к	33,6	23,5	18,2	41,7	73,5	-	194,6	16x22
	л-м	-82	-34	-78,6	-112,6	-	194,6	-	
Стойки	2-а	-9,5	-13,05	0	-13,05	-	22,65	22,65	12x16
	б-в	0	0	0	0	-	-		
	е-д	-20	-13,05	-13,05	-26,1	-	46,1	46,1	
	е-ж	0	0	0	0	-	-		
	з-и	-20	-13,05	-13,05	-26,1	-	46,1	46,1	
	к-л	0	0	0	0	-	-		
	м-2	-9,5	0	-13,05	-13,05	-	22,65	22,65	

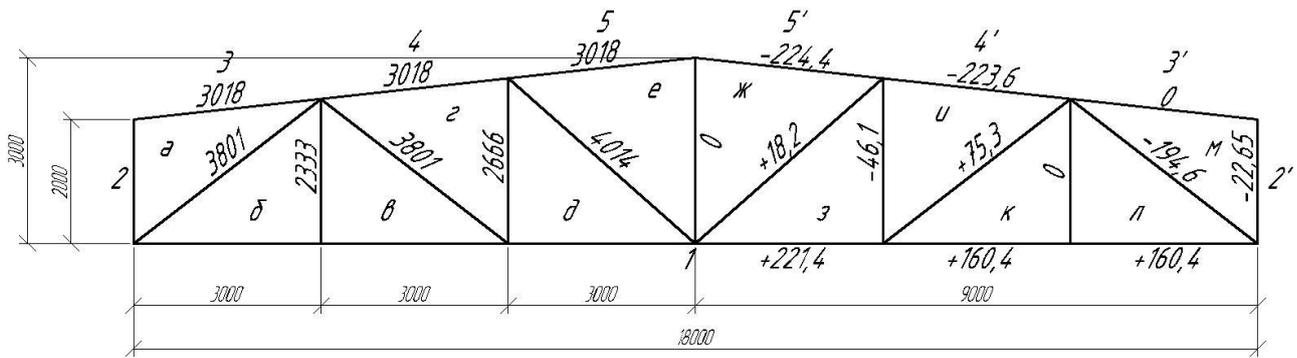


Рисунок 3 – Геометрическая схема фермы (длины указаны в мм, усилия в кН)

Перед расчетом соединения фермы со связями, работающими на срез, в качестве исходных данных служат поперечное сечение нижнего пояса размерами 170x220 мм и продольное усилие растяжения в поясе, равное $N=221,4$ кН.

Расчет рассматриваемого узла по нижнему поясу фермы будем выполнять в соответствии со следующим алгоритмом.

1. Определяем максимальные возможные значения диаметра стержня d и глубины его внедрения в массив древесины:

- диаметр стержня принимаем равным 20 мм, который должен быть не более $1/10h=1/10 \cdot 220=22$ мм. Принимаем диаметр стержня равным 16 мм;
- глубина внедрения стержня в массив древесины должна быть не более величины $b-1\text{ см} = 17-1=16$ см. Принимаем глубину внедрения равной 15 см.

2. Определяем несущую способность одного стержня в соответствии с принятыми диаметром, расчетной глубиной его защемленной части, способом забивки, фактической плотности древесины и угла наклона стержня к волокнам древесины.

3. Из условия $n=N/[T]$ определяем требуемое количество стержней, проводя корректировку в зависимости от их количества.

4. Устанавливаем шаг расстановки стержней S_1, S_2, S_3 и размеры объединяющей пластины, причем толщина пластины должна быть не менее $0,7d$.

В соответствии с [5] при расчете соединений деревянных элементов на витых нагелях крестообразного поперечного сечения несущая способность определяется из условия смятия деревянных элементов и изгиба соединительного элемента.

Зададимся толщиной накладок из полосовой стали. Требуемая площадь сечения для металлических накладок из полосовой стали по условиям работы накладки на растяжение:

$$F_p = \frac{N}{R_y} = \frac{221,4}{23} = 9,63 \text{ см}^2.$$

откуда толщина листа стали δ :

$$\delta = \frac{9,63}{2 \cdot h} = \frac{9,63}{2 \cdot 22} = 0,21 \text{ см.}$$

Из конструктивных соображений толщину листа полосовой стали накладок $\delta=10$ мм.

Считая, что смятию подвержена только древесина, вычислим значение предельного усилия по смятию древесины нижнего пояса фермы для соединения одним витым нагелем по формуле:

$$T_{см} = k \cdot l_{заб} \cdot d \cdot R_{см}, \text{ кН,} \quad (1)$$

где $R_{см}$ – временное сопротивление древесины нижнего пояса смятию;

d – габаритные размеры стержня (диаметр, равный 1,4 см);

$l_{заб}$ – глубина забивки стержня;

k – коэффициент, характеризующий степень использования нагельного гнезда в каждом элементе, определяемый по формуле:

$$k = \frac{-\left(1 + \frac{1}{n}\right) + \sqrt{\left(1 + \frac{1}{n}\right)^2 + (1+m) \cdot \left(1 + \frac{1}{m \cdot n^2}\right)}}{1+m}, \quad (2)$$

где m, n – значения, определяемые по формулам:

$$m = \frac{R_{см}^{др}}{R_{см}^{ст}}, \quad (3)$$

$$n = \frac{b}{\delta}. \quad (4)$$

Вычислим значения m и n :

$$m = \frac{1,3}{47,5} = 0,03,$$

$$n = \frac{17}{1} = 17.$$

$$k = \frac{-\left(1 + \frac{1}{17}\right) + \sqrt{\left(1 + \frac{1}{17}\right)^2 + (1 + 0,03) \cdot \left(1 + \frac{1}{0,03 \cdot 17^2}\right)}}{1 + 0,03} = 0,43,$$

Вычислим расчетную несущую способность одного соединения на смятие по формуле (1):

$$T_{\text{см}} = 0,43 \cdot 15 \cdot 1,6 \cdot 1,3 = 13,42 \text{ кН},$$

Требуемое количество витых стержней на одну сторону укрупнительного стыка:

$$n_c = \frac{N}{T_{\text{см}}} = \frac{221,4}{13,42} = 16,5 \Rightarrow 18 \text{ стержней.}$$

С учетом двустороннего размещения накладок принимаем 8 стержней и ставим их в один ряд.

Длина накладки при $s_1 = 6d = 9,6 \text{ см} \approx 10 \text{ см}$:

$$l_H = 2 \cdot (9 \cdot 10 + 2,5 \cdot 1,4 \cdot 2) = 194 \approx 200 \text{ см.}$$

Предельная несущая способность соединения из условия изгиба соединительного элемента (витого нагеля) определяется по формуле:

$$T_{\text{см}} = k_{\text{И}} \cdot d^2 \cdot \sqrt{R_{\text{см}} \cdot R_{\text{T}}}, \text{ кН}, \quad (5)$$

где R_{T} – предел текучести стали витого нагеля;

$k_{\text{И}}$ – числовой коэффициент, определяемый той или иной схемой исчерпания прочности соединения с образованием по длине пластических шарниров, вычисляемый по формуле:

$$k_{\text{И}} = k' \cdot \frac{a}{d} \cdot \sqrt{R_{\text{см}} / R_{\text{T}}} \cdot m_a, \quad (6)$$

$$k' = \frac{\sqrt{1 + (1 + 2 \cdot m_a) \cdot \left(1 + \frac{4M_{\text{пл}}}{b^2 \cdot d \cdot R_{\text{см}}}\right)} - 1}{1 + 2 \cdot m_a}, \quad (7)$$

где $M_{пл}$ – предельный пластический момент поперечного сечения стержня, определяемый по формуле:

$$M_{пл} = W_{пл} \cdot R_T, \quad (8)$$

где $W_{пл}$ – пластический момент сопротивления прямолинейного крестообразного стержня с толщиной ребра $t=2\text{мм}$, который можно определить по таблице 3.1 [5].

$$M_{пл} = 0,142 \cdot 78,5 = 11,15 \text{ кН} \cdot \text{см}.$$

Вычислим необходимые коэффициенты по формулам (6) и (7):

$$m = \frac{47,5}{78,5} = 0,61,$$

$$k' = \frac{\sqrt{1 + (1 + 2 \cdot 0,61) \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot 11,15}{16^2 \cdot 1,6 \cdot 1,3}\right)} - 1}{1 + 2 \cdot 0,61} = 0,38,$$

$$k_{и} = 0,38 \cdot \frac{17}{1,6} \cdot \sqrt{1,3 / 78,5} \cdot 0,61 = 0,83.$$

Вычислим предельную несущую способность одного соединения из условия изгиба витого нагеля по формуле (5):

$$T_{и} = 0,83 \cdot 1,6^2 \cdot \sqrt{1,3 \cdot 78,5} = 21,46 \text{ кН}.$$

Следует вывод, что предельная несущая способность соединения на изгиб витого нагеля почти в 2 раза превышает несущую способность соединения на смятие древесины нижнего пояса фермы. Первоначальное количество витых нагелей назначено верно.

Схема расстановки витых нагелей в укрупнительном стыке фермы приведена на рисунке 4.

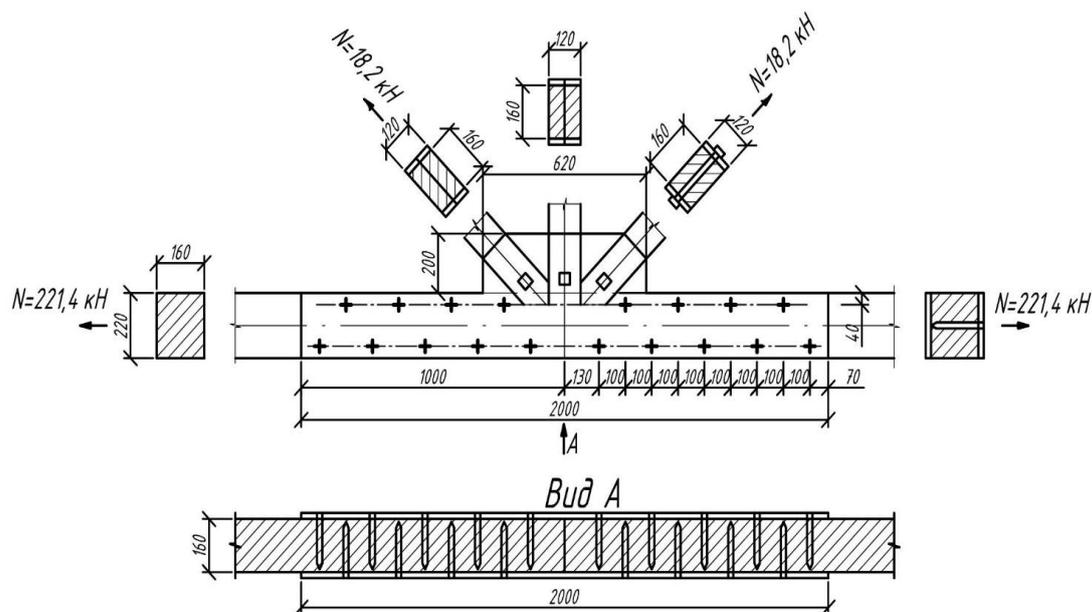


Рисунок 4 – Центральный укрупнительный узел нижнего пояса фермы

Список литературы

1. СП 64.13330.2011. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80 (с Изменением N 1). – М.: Минрегион России, 2011. – 92 с.
2. Дмитриев, П.А. Соединения элементов деревянных конструкций на стальных винтовых крестообразных стержнях, работающих на выдергивание [Электронный ресурс] / П. А. Дмитриев, В. И. Жаданов, Г. А. Столповский // Известия вузов. Строительство, 2010. - № 4. - С. 133-137.
3. Столповский, Г.А. Соединение элементов деревянных конструкций быстровозводимых зданий и сооружений винтовыми крестообразными нагелями [Электронный ресурс] / Столповский Г. А., Жаданов В. И., Руднев И. В. // Вестник Оренбургского государственного университета, 2010. - № 5, май. - С. 150-154.
4. Дмитриев, П.А., Жаданов, В.И., Михайленко, О.А. Конструкции из дерева и пластмасс. Курс в вопросах и ответах/ П. А. Дмитриев, В. И. Жаданов, О. А. Михайленко. Конструкции из дерева и пластмасс. Курс в вопросах и ответах. – Оренбург: ООО «НикОс», 2011. – 480 с.
5. Аркаев М.А. Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. Оренбург: 2017 – 190 с.
6. Аркаев М.А., Жаданов В.И. Расчет односрезных соединений на винтовых крестообразных нагелях при усилении деревянных конструкций путем увеличения поперечного сечения // Известия вузов. Строительство. - №2. - 2017. - С. 92-100.
7. Филиппов, Н. А. Примеры расчета и проектирования деревянных конструкций. – М.: Стройиздат, 1965. – 301 с.