

РАСЧЕТ ДЕРЕВЯННЫХ ФЕРМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ
НЕОДНОРОДНОСТИ СВОЙСТВ*

nemirov@itam.nsc.ru

Разработана методика расчета элементов деревянных ферменных конструкции при учете естественных особенностей дерева, связанных с его разносопротивляемостью растяжению-сжатию, и неоднородностью свойств вдоль ствола дерева.

Ключевые слова: деревянные конструкции, фермы, неоднородность свойств, нелинейные деформации

Древесина вследствие своего органического происхождения относится к анизотропным материалам. Различие в свойствах древесных пород и неоднородности свойств материала каждой породы связано с различием анатомического строения клеток ранней и поздней древесины, характером спирального расположения фибрилл, распределением влаги, климатических условий роста, особенностями почвенных оснований и даже особенностями преимущественного проявления ветровых нагрузок. В связи с этим дерево, как конструкционный материал обнаруживает ряд особенностей деформирования и разрушения, которые к настоящему времени не изучены в полной мере.

На основе многочисленных и разнообразных испытаний образцов малых объемов и размеров установлен взгляд, что древесина является ортотропным и однородным телом и на его основе развиты методы расчетов элементов деревянных конструкций [1–4]. В то же время

$$\begin{aligned}\sigma^+(\varepsilon) &= A_1^+(\xi)\varepsilon + A_2^+(\xi)\varepsilon^2, \quad \varepsilon \geq 0, \quad A_1^+ > 0, \quad A_2^+ < 0, \\ \sigma^-(\varepsilon) &= A_1^-(\xi)\varepsilon + A_2^-(\xi)\varepsilon^2, \quad \varepsilon \leq 0, \quad A_1^- > 0, \quad A_2^- > 0,\end{aligned}\quad (1)$$

где $A_1^\pm(\xi)$, $A_2^\pm(\xi)$ – коэффициенты аппроксимации диаграмм деформирования образцов, вырезанных на разных расстояниях ξ от комля ствола дерева (знак “+” означает растяжение, “–” – сжатие). Немногочисленные обнаруженные в литературе данные [1–5] показывают, что модули упругости, пределы прочности, плотность

экспериментально установлено, что вдоль ствола дерева в направлении от комля к вершине свойства деревянных образцов существенно изменяются [1, 5] и образцы в условиях растяжения и сжатия обнаруживают различные свойства нелинейного деформирования. Таким образом, изделие из дерева при больших его линейных размерах в реальных условиях нагружения будет вести себя, как неупругое и неоднородное тело, что должно быть учтено при разработке расчетных методик.

Правильный учет естественной неоднородности продольных свойств древесины позволит приспособить ее к конкретным условиям работы конструкций упростить технологию и трудоемкость изготовления, снизить отходы пиломатериалов. В связи с этим, учитывая свойство разносопротивляемости образцов при растяжении и сжатии, как и в [6, 7], примем следующие зависимости между напряжениями и деформациями.

для различных пород деревьев практически линейно уменьшаются в направлении от комля к вершине. В связи с этим для коэффициентов A_1^\pm , A_2^\pm в выражениях (1) и пределов прочности можно принять зависимости

$$A_i^\pm(\xi) = A_{0i}^\pm(1 - k_i^\pm \xi), \quad k_i^\pm \geq 0, \quad A_i^\pm(\xi) = A_{0i}^\pm e^{c_i^\pm \xi}, \quad c_i^\pm < 0, \quad (i = 1, 2) \quad (2)$$

$$\sigma_*^\pm(\xi) = \sigma_{0*}^\pm(1 - r_1^\pm \xi) \quad \text{или} \quad \sigma_*^\pm(\xi) = \sigma_{0*}^\pm \exp(-r_2^\pm \xi), \quad (3)$$

где A_{0i}^\pm , k_i^\pm , A_{0i}^\pm , c_i^\pm , σ_{0*}^\pm , r_1^\pm , r_2^\pm – константы.

На основе обработки имеющихся данных [1–5] (аппроксимация экспериментальных данных методом наименьших квадратов) определе-

ны константы A_{0i}^\pm , k_i^\pm , σ_{0*}^\pm , r_1^\pm – для линейных зависимостей (2) и (3) для древесины уральской сосны

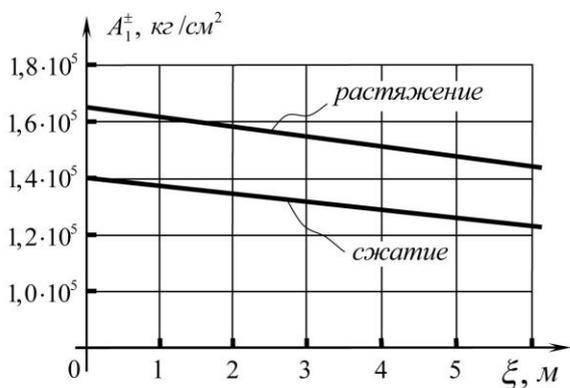
$$A_{01}^+ = 1,637 \cdot 10^5 \text{ кг/см}^2; k_1^+ = 2,002 \cdot 10^{-2} \text{ кг/(см}^2 \text{ м)}; A_{02}^+ = -5,536 \cdot 10^6 \text{ кг/см}^2;$$

$$k_2^+ = 6,451 \cdot 10^{-2} \text{ кг/(см}^2 \text{ м)}; \sigma_{0*}^+ = 1075 \text{ кг/см}^2; r_1^+ = 1,389 \cdot 10^{-2} \text{ кг/(см}^2 \text{ м)};$$

$$A_{01}^- = 1,404 \cdot 10^5 \text{ кг/см}^2; k_1^- = 1,718 \cdot 10^{-2} \text{ кг/(см}^2 \text{ м)}; A_{02}^- = 1,147 \cdot 10^7 \text{ кг/см}^2;$$

$$k_2^- = 4,914 \cdot 10^{-2} \text{ кг/(см}^2 \text{ м)}; \sigma_{0*}^- = -427,8 \text{ кг/см}^2; r_1^- = 1,389 \cdot 10^{-2} \text{ кг/(см}^2 \text{ м)}.$$

а



б

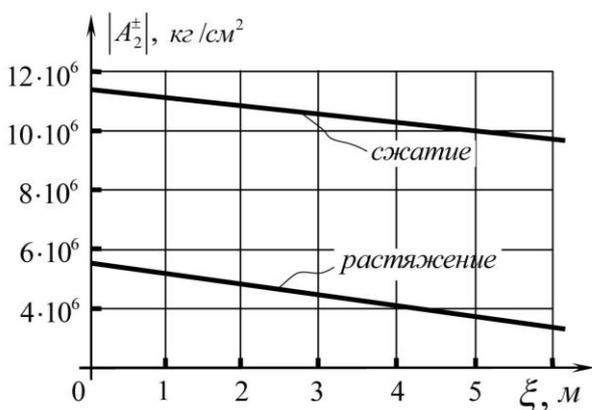


Рисунок 1. Графики изменения аппроксимирующих коэффициентов A_1^\pm и A_2^\pm вдоль ствола дерева для древесины уральской сосны:

а - график изменения коэф. A_1^\pm ;
б - график изменения коэф. A_2^\pm

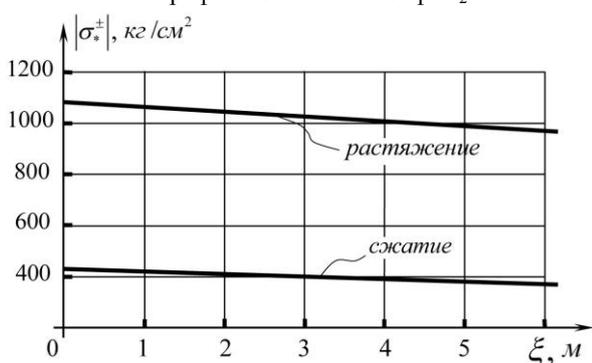


Рисунок 2. График изменения пределов прочности вдоль ствола дерева для древесины уральской сосны

Графики изменения коэффициентов A_1^\pm , A_2^\pm и пределов прочности σ_{*}^\pm (“+” – растяжение, “-” – сжатие) по длине ствола от комля ($\xi = 0$) к вершине приведены на рис. 1, 2 соответственно.

При проведении специальной целевой программы испытаний эти зависимости могут быть уточнены.

Соотношения (1), (2), (3) позволяют исследовать на примерах ряда простейших стержневых конструкций из дерева влияние неоднородности на их несущую способность и деформационную податливость.

Рассмотрим случай центрального растяжения-сжатия деревянного стержня. Если деревянный брус использован в качестве колонны (рис.3), то уравнение равновесия для него будет иметь вид:

$$\frac{dN}{dx} - \gamma(\xi)F(x) = 0, \quad N(x) = \sigma(x)F(x), \quad (4)$$

где

$$\gamma(\xi) = \gamma_0 \left(1 - \frac{d_1}{\gamma_0} \xi \right) \quad \text{или} \quad \gamma(\xi) = \gamma_0 e^{-c_1 \xi} \quad (5)$$

γ_0 – удельный вес древесины в окрестности комля, c_1 , d_1 – константы, ξ – координата, отсчитываемая вдоль ствола дерева от комля к вершине, ξ_0 – координата начального среза ствола в районе комля, x – текущая координата вдоль оси колонны, $F(x)$ – площадь поперечного сечения колонны. Координата ξ изменяется в пределах длины ствола $0 \leq \xi \leq l_0$, где l_0 – длина ствола дерева.

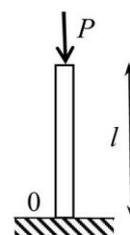


Рисунок 3. Расчетная схема колонны

Если l – длина колонны, то $x = \xi - \xi_0$, когда направление осей x и ξ совпадают и $x = -\xi + \xi_0 + l$, когда направление осей x и ξ противоположны. Если площадь поперечного сечения $F(x)$ известна, то интегрируя уравнение (4) при учете зависимостей (5) и граничного условия

$$N|_{x=l} = -P \quad (6)$$

для напряжения $\sigma(x)$ получим выражение

$$\sigma^-(x) = \frac{N(x)}{F(\xi)},$$

$$N(x) = -\left(P + \int_x^l \gamma(\xi) F(\xi) dx \right) \quad (7)$$

Деформация сжатия колонны в соответствии с законом (1) будет иметь выражение

$$\varepsilon^-(x) = \frac{dU^-(x)}{dx} = \varphi_1^-(x), \quad (8)$$

$$\varphi_1^-(x) = -\frac{A_1^-(\xi)}{2A_2^-(\xi)} + \sqrt{\frac{N(x)}{A_2^-(\xi)F(\xi)} + \left(\frac{A_1^-(\xi)}{2A_2^-(\xi)} \right)^2}, \quad (9)$$

откуда для перемещения нагруженного конца колонны, получим

$$U_1^-(l) = \int_0^l \varphi_1^-(x) dx. \quad (10)$$

Для проекта “равнопрочной” колонны, где в любом сечении по длине колонны достигается предел прочности при учете неоднородности свойств для напряжений $\sigma^-(x)$ следует принять равенство

$$\sigma^-(x) = \sigma_*^-(\xi), \quad (11)$$

Подставляя напряжения (11) в уравнения равновесия (4) для площади $F(x)$ получим уравнение

$$\frac{d}{dx} \ln(F(x)\sigma_*^-(\xi)) = -\frac{\gamma(\xi)}{\sigma_*^-(\xi)},$$

интегрируя его с учетом граничного условия (5), получим

$$F(x)\sigma_*^-(\xi) = -P \exp \int_x^l \frac{\gamma(\xi)}{\sigma_*^-(\xi)} dx. \quad (12)$$

Уравнение для перемещения такого стержня будет иметь вид

$$x_i = \frac{\bar{x}_i}{x_0}; \quad y_i = \frac{\bar{y}_i}{x_0}; \quad U_i = \frac{\bar{U}_i}{x_0}; \quad V_i = \frac{\bar{V}_i}{x_0}, \quad P_i = \frac{\bar{P}_i}{P_0}; \quad F_{km} = \frac{\bar{F}_{km}}{\bar{F}_0}; \quad \rho_{km} = \frac{\bar{\rho}_{km}}{\bar{\rho}_0}; \quad c_{km} = \frac{\bar{c}_{km}}{\bar{c}_0},$$

где \bar{x}_i, \bar{y}_i – координаты i -го узла фермы; \bar{U}_i, \bar{V}_i – компоненты перемещения i -го узла фермы вдоль оси x и оси y соответственно; x_0, P_0 – безразмеривающие параметры; $F_{km}, \rho_{km}, c_{km}$ – соответственно площадь, плотность и удельная стоимость материала km -стержня фермы, $\bar{F}_0, \bar{\rho}_0, \bar{c}_0$ – соответственно площадь стержней, плотность материала и удельная стоимость материала эталонной фермы.

Определим безразмерную длину и направляющие косинусы стержней фермы:

$$l_{km} = \sqrt{(x_m - x_k)^2 + (y_m - y_k)^2}; \quad (15)$$

$$\frac{dU^-(x)}{dx} = \varphi_2(x),$$

$$\varphi_2(x) = -\frac{A_1^-(\xi)}{2A_2^-(\xi)} + \sqrt{\frac{\sigma_*^-(x)}{A_2^-(\xi)} + \left(\frac{A_1^-(\xi)}{2A_2^-(\xi)} \right)^2} \quad (13)$$

и перемещение нагруженного конца такой колонны будет определяться равенством

$$U_2^-(l) = \int_0^l \varphi_2(x) dx. \quad (14)$$

Расчет ферменных конструкций рассмотрим на примере треугольной фермы (рис. 4) по методике описанной в [9].

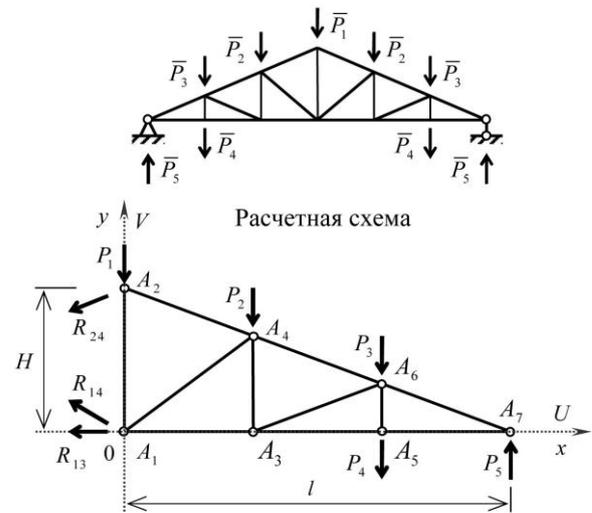


Рисунок 4. Треугольная ферма

Обозначим:

$$\beta_{km} = \frac{x_m - x_k}{l_{km}}; \quad \gamma_{km} = \frac{y_m - y_k}{l_{km}}. \quad (16)$$

Усилия в стержнях фермы определяются методом вырезания узлов.

Деформация стержней фермы:

$$\varepsilon_{km} = \frac{(U_m - U_k)(x_m - x_k) + (V_m - V_k)(y_m - y_k)}{l_{km}^2}. \quad (17)$$

Если элементы фермы неравнопрочны, то напряжения в них определяются равенствами

$$\sigma_{km}(\xi_{km}) = \frac{N_{km}}{F_{km}(\xi_{km})}. \quad (18)$$

Для стержней постоянного сечения имеем

$$F_{km}(\xi_{km}) = F_{km}^0 = const.$$

Учитывая закономерности деформирования (1) для деформаций стержневых элементов рас-

сматриваемой фермы получим выражения

$$\varepsilon_{km}^{\pm}(x_{km}) = \varphi_{km}^{\pm}(x_{km}) = \pm \frac{A_{1(km)}^{\pm}(\xi_{km})}{2A_{2(km)}^{\pm}(\xi_{km})} \mp \sqrt{\left(\frac{A_{1(km)}^{\pm}}{2A_{2(km)}^{\pm}}\right)^2 \pm \frac{\sigma_{km}^{\pm}(\xi_{km})}{A_{2(km)}^{\pm}}} \quad (19)$$

При известных значениях деформаций стержней, учитывая условия закрепления фермы, путем интегрирования нетрудно определить удлинение стержней фермы (20), а затем перемещения узлов.

$$U_{km}^{\pm}(l_{km}) = \int_0^{l_{km}} \varphi_{km}^{\pm}(x_{km}) dx_{km} \quad (20)$$

При проектировании равнопрочной фермы для напряжений в элементах фермы будем иметь выражения

$$\sigma_{*(km)}^{\pm} = \pm \sigma_{0*(km)}^{\pm} (1 - r_{1(km)}^{\pm} \xi_{km})$$

или

$$\sigma_{*(km)}^{\pm} = \pm \sigma_{0*(km)}^{\pm} \exp(-r_{2(km)}^{\pm} \xi_{km}), \quad (21)$$

Подставляя эти выражения в (19) получим соответствующие формулы для деформаций. В этом случае площади сечения элементов фермы будут определяться выражениями

$$F_{km}(\xi_{km}) = \frac{|N_{km}|}{|\sigma_{*(km)}^{\pm}|} = F_{km}(\xi_{km}). \quad (22)$$

Общий вес и стоимость ферменной конструкции будут определяться равенствами

$$B = \sum \int_{\xi_{0km}}^{\xi_{1km}} F_{km}(\xi_{km}) \gamma_{km}(\xi_{km}) d\xi_{km},$$

$$C = \sum c_{km} \int_{\xi_{0km}}^{\xi_{1km}} F_{km}(\xi_{km}) \gamma_{km}(\xi_{km}) d\xi_{km} \quad (23)$$

где $\gamma_{km}(\xi_{km}) = \gamma_{0km}(1 - d_{km}\xi_{km})$ – удельный вес породы дерева соответствующей km -стержню.

В качестве примера рассмотрим расчет треугольной фермы изображенной на рис.4.

Длина фермы – $l = 9$ м; высота фермы – $H = 0,25l$; узловые нагрузки: $P_1 = 8$ т, $P_2 = 8$ т, $P_3 = 8$ т, $P_4 = 10$ т, $P_5 = 30$ т, $x_0 = l$.

Таблица 1

Координаты узлов							
№ узла	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇
\bar{x}_i	0	0	1/3 l	1/3 l	2/3 l	2/3 l	l
\bar{y}_i	0	H	0	2/3 H	0	1/3 H	0

Выражения для определения усилий в стержнях фермы:

$$N_{12} = \frac{N_{24}\gamma_{24} + R_{24}\gamma_{R24} - P_1}{\gamma_{12}}; \quad N_{13} = \frac{-N_{35}(\beta_{35}\gamma_{34} - \beta_{34}\gamma_{35}) - N_{36}(\beta_{36}\gamma_{34} - \beta_{34}\gamma_{36})}{(\beta_{34}\gamma_{13} - \beta_{13}\gamma_{34})};$$

$$N_{14} = \frac{N_{34}(\beta_{34}\gamma_{24} - \beta_{24}\gamma_{34}) - N_{46}(\beta_{46}\gamma_{24} - \beta_{24}\gamma_{46}) - P_2\beta_{24}}{(\beta_{24}\gamma_{14} - \beta_{14}\gamma_{24})};$$

$$N_{24} = -\frac{N_{34}(\beta_{34}\gamma_{14} - \beta_{14}\gamma_{34})}{(\beta_{24}\gamma_{14} - \beta_{14}\gamma_{24})} + \frac{N_{46}(\beta_{46}\gamma_{14} - \beta_{14}\gamma_{46})}{(\beta_{24}\gamma_{14} - \beta_{14}\gamma_{24})} + \frac{P_2\beta_{14}}{(\beta_{24}\gamma_{14} - \beta_{14}\gamma_{24})}; \quad R_{24} = N_{24}$$

$$N_{34} = -\frac{N_{35}(\beta_{35}\gamma_{13} - \beta_{13}\gamma_{35})}{(\beta_{34}\gamma_{13} - \beta_{13}\gamma_{34})} - \frac{N_{36}(\beta_{36}\gamma_{13} - \beta_{13}\gamma_{36})}{(\beta_{34}\gamma_{13} - \beta_{13}\gamma_{34})};$$

$$N_{35} = -\frac{N_{57}(\beta_{57}\gamma_{56} - \beta_{56}\gamma_{57})}{(\beta_{56}\gamma_{35} - \beta_{35}\gamma_{56})} - \frac{P_4(\beta_{P4}\gamma_{56} - \beta_{56}\gamma_{P4})}{(\beta_{56}\gamma_{35} - \beta_{35}\gamma_{56})};$$

$$N_{36} = \frac{N_{56}(\beta_{56}\gamma_{46} - \beta_{46}\gamma_{56}) - N_{67}(\beta_{67}\gamma_{46} - \beta_{46}\gamma_{67}) - P_3\beta_{46}}{(\beta_{46}\gamma_{36} - \beta_{36}\gamma_{46})};$$

$$N_{46} = -\frac{N_{56}(\beta_{56}\gamma_{36} - \beta_{36}\gamma_{56})}{(\beta_{46}\gamma_{36} - \beta_{36}\gamma_{46})} + \frac{N_{67}(\beta_{67}\gamma_{36} - \beta_{36}\gamma_{67})}{(\beta_{46}\gamma_{36} - \beta_{36}\gamma_{46})} + \frac{P_3\beta_{36}}{(\beta_{46}\gamma_{36} - \beta_{36}\gamma_{46})};$$

$$N_{56} = \frac{-N_{57}(\beta_{57}\gamma_{35} - \beta_{35}\gamma_{57}) - P_4(\beta_{P4}\gamma_{35} - \beta_{35}\gamma_{P4})}{(\beta_{56}\gamma_{35} - \beta_{35}\gamma_{56})};$$

$$N_{57} = \frac{P_5\beta_{67}}{(\beta_{67}\gamma_{57} - \beta_{57}\gamma_{67})}; \quad N_{67} = -\frac{P_5\beta_{57}}{(\beta_{67}\gamma_{57} - \beta_{57}\gamma_{67})}.$$

Для определения узловых перемещений, запишем деформации стержней фермы, используя выражение (3), получаем систему линейных уравнений, число которых равно количеству стержней фермы. По условиям закрепления узлы A_1 , A_2 и A_7 ограничены в смещениях: $\bar{U}_1 = 0$; $\bar{U}_2 = 0$; $\bar{V}_7 = 0$.

Решая полученную систему уравнений, определяем горизонтальные и вертикальные перемещения узлов U_i , V_i .

За эталонную конструкцию примем ферму, стержни которой изготовлены из сосны, площадь стержней одинакова и подобрана по наиболее нагруженному стержню. Перемещения узлов эталонной фермы определялись из условия, что зависимость между напряжениями и деформациями квадратичная (1). Вес эталонной фермы равен $B_0 = 440,8$ кг площадь стержней равна $\bar{F}_0 = 301,7$ см².

Фермы разделены на два вида: первый вид – фермы, стержни которой изготовленные из «комлевой» части ствола дерева ($\xi_0 = 0$); второй – фермы, стержни которой изготовленные из «вершинной» части ствола ($\xi_0 = l_0 - l_{km}$, $l_0 = 6$ м).

Расчеты ферм проведены при следующих условиях:

1) сечения стержней фермы подобраны из условия прочности, зависимость между напряжениями и деформациями квадратичная, модули упругости и пределы прочности не изменяются

по длине стержня, причем пределы прочности равны «расчетным» значениям ($\sigma_*^+ = 1030$ кг/см², $\sigma_*^- = 410$ кг/см²);

2) сечения стержней фермы подобраны из условия прочности, зависимость между напряжениями и деформациями квадратичная, модули упругости переменны по длине стержня, пределы прочности равны минимальным значениям по длине ствола ($0 \leq \xi \leq l_0$) ($\sigma_*^+(\xi)_{\min} = 985$ кг/см², $|\sigma_*^-(\xi)|_{\min} = 392$ кг/см²), расчеты выполнены для двух видов ферм;

3) сечения стержней фермы подобраны из условия равнопрочности, зависимость между напряжениями и деформациями квадратичная, модули упругости и пределы прочности переменны по длине стержня, расчеты выполнены для двух видов ферм.

Безразмерный вес проектируемых конструкций будем искать в виде:

$$e_{sp} = \frac{B_{sp}}{B_0}, \quad (24)$$

где s – номер вида фермы, p – номер условий расчета.

Результаты расчетов представлены в таблицах 1, 2. В таблице 2 приведены усилия, длины и площади стержней ферм (для ферм в которых сечения стержней подобраны из условия равнопрочности приведены максимальные (начальные) F_{0km} площади стержней), в таблице 3 приведены перемещения узлов.

Таблица 2

Усилия, длины и площади стержней фермы

№ стержня	N_{km} , кг	l_{km} , б/р	$B_0 = 440,8$ кг	$e_{11} = 0,404$	$e_{12} = 0,423$	$e_{13} = 0,396$	$e_{23} = 0,413$
			F_{km} , см ²	F_{km} , см ²	F_{km} , см ²	F_{0km} , см ²	F_{0km} , см ²
1-2	22667	0,250	301,69	22,010	23,01	21,09	22,24
1-3	84000	0,333	301,69	81,55	85,28	78,14	81,54
1-4	-25342	0,373	301,69	61,81	64,65	59,23	61,49
2-4	-63221	0,344	301,69	154,2	161,28	147,77	153,99
3-4	9000	0,167	301,69	8,74	9,14	8,37	8,93
3-5	120000	0,333	301,69	116,5	121,83	111,63	116,48
3-6	-37108	0,344	301,69	90,51	94,66	86,74	90,39
4-6	-86585	0,344	301,69	211,18	220,88	202,38	210,9
5-6	10000	0,083	301,69	9,71	10,15	9,3	10,03
5-7	120000	0,333	301,69	116,5	121,83	111,63	116,48
6-7	-123693	0,344	301,69	301,69	315,54	289,12	301,29

Таблица 3

Перемещения узлов фермы, см

№ узла		A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇
B ₀	U, см	0	0	0,577	-0,493	1,425	-0,557	2,274
	V, см	-21,253	-21,141	-20,798	-20,769	-17,562	-17,545	0
B ₁₁	U, см	0	0	2,748	-1,991	5,497	-1,348	8,245
	V, см	-53,708	-51,647	-54,761	-53,387	-45,283	-44,596	0
B ₁₂	U, см	0	0	2,536	-1,79	5,072	-1,177	7,608
	V, см	-49,03	-47,131	-49,991	-48,727	-41,337	-40,706	0
B ₂₂	U, см	0	0	2,56	-1,824	5,12	-1,213	7,68
	V, см	-49,691	-47,769	-50,666	-49,383	-41,898	-41,256	0
B ₁₃	U, см	0	0	2,833	-2,096	5,666	-1,457	8,498
	V, см	-55,876	-53,731	-56,979	-55,535	-47,13	-46,4	0
B ₂₃	U, см	0	0	2,647	-1,906	5,294	-1,28	7,941
	V, см	-51,587	-49,617	-52,593	-51,289	-43,483	-42,836	0

Расчеты ферм выполнены при длине ствола $l_0 = 6$ м, увеличение длины ствола дерева существенно влияет на вес ферм, стержни которой изготовленные из «вершинной» части ствола и подобраны из условия равнопрочности. Например, если вес треугольной равнопрочной фермы при $l_0 = 6$ м равен $B_{13} = 175,4$ кг ($\epsilon_{13} = 0,396$) и $B_{23} = 182,1$ кг ($\epsilon_{23} = 0,413$) и разница составляет 3,8% (6,7 кг), то при $l_0 = 9$ м $B_{13} = 175,4$ кг ($\epsilon_{13} = 0,396$), а $B_{23} = 190,5$ кг ($\epsilon_{23} = 0,432$), разница достигает 8,6% (15,1 кг).

Проведенные расчеты показывают, что при учете реальных особенностей древесины можно получить при заданном уровне нагружения проекты с улучшением качественных характеристик по весу. Вес и перемещения узлов фермы зависят от того из какой части ствола дерева изготовлены стержни фермы. Фермы, стержни которой изготовленные из «комлевой» части ствола, выигрывают по весу у ферм, чьи элементы выполнены из верхней части стволов деревьев, а по деформативности проигрывают.

*Работа выполнена по гранту РФФИ №11-08-00186а.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Леонтьев, Н.Л. Упругие деформации древесины/ Н.Л. Леонтьев – М.-Л.: Гослесбумиздат, 1952. – 117с.

2. Митинский, А.Н. Упругие постоянные древесины как ортотропного материала/ А.Н. Митинский: Труды ЛТА. – № 65. – Л., 1949.

3. Ашкенази, Е.К. Анизотропия древесины и древесных материалов/ Е.К. Ашкенази – М.: Лесная промышленность, 1978. 222с.

4. Филимонов, Э.В. Конструкции из дерева и пластмасс/ Э.В. Филимонов, Л.К. Ермоленко, М.М. Гаппоев – М.: Изд-во ассоциации строительных вузов, 2004. – 438с.

5. Иванов, Ю.М. О деформациях и напряжениях в древесине, как неоднородном материале/ Ю.М. Иванов: Труды Института леса АН СССР. – т. IV. – М.-Л.: Изд. АН СССР, 1949.

6. Немировский, Ю.В. Расчет и рациональное проектирование деревянных стержневых элементов/ Современные проблемы совершенствования и развития конструкций в строительстве и на транспорте // Ю.В. Немировский: Труды III Междунар. науч.-техн. конф. – Самара: Изд-во СамГАСУ, 2005. – с. 247-251.

7. Мищенко, А.В. Расчет и проектирование деревянных стержневых систем с учетом физической нелинейности/ А.В. Мищенко, Ю.В. Немировский// Строительная механика и расчет сооружений. – 2007. – № 6. – с. 46-52.

8. Белов, С.В. Ветер – главный фактор, определяющий форму стволов деревьев и их устойчивость/ Лесоводство, лесные культуры и почвоведение// С.В. Белов: Межвузовский сб. науч. тр. / Ленинградская лесотехническая академия им. С. М. Кирова. – Вып. III. – Л., 1974. – с. 3-24.

9. Немировский, Ю.В. Синтез плоских ферменных конструкций/ Проблемы оптимального проектирования конструкций // Ю.В. Немировский: Сб. докл. IV Всероссийского семинара – Новосибирск: Изд-во НГАСУ, 2002. – с. 274-281