

Найчук А.Я., Черноиван Н.В.

## К ОЦЕНКЕ ВЫСОТЫ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ДЕРЕВЯННЫХ ПАНЕЛЕЙ РАЗРЕЗНОГО ВЕРХНЕГО ПОЯСА СЕГМЕНТНОЙ ФЕРМЫ

При изготовлении сквозных конструкций наибольшие трудности вызывает решение узлов. Чем меньше элементов сходится в узле, и чем меньше усилия в этих элементах, тем проще конструкция узлов. В этом отношении сегментные фермы являются наиболее выгодной конструкцией. Очертание верхнего пояса близкое к кривой давления от нагрузки, равномерно распределенной по всему пролету фермы, позволяет существенно снизить усилия в элементах решетки и применить треугольную решетку с узлами, в которых сходится не более двух элементов решетки.

Как показывает практика, для Республики Беларусь наиболее эффективными, с точки зрения рационального использования местных строительных материалов, являются сегментные фермы с разрезным верхним поясом, выполненным из клееной древесины [2].

Такое конструктивное решение верхнего пояса позволяет считать его состоящим из отдельных шарнирно-опертых элементов (панелей), работающих на осевое сжатие. Но вследствие криволинейного очертания верхнего пояса за счет эксцентриситета, равного стреле подъема панели, в нем возникает изгибающий момент. Поэтому расчёт панелей разрезного верхнего пояса сегментных ферм в соответствии с действующими нормами выполняется как изгибаемого элемента с осевым сжатием по следующей методике [1].

Поперечное сечение такого элемента проверяется:

а) на прочность по формуле

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{k_{m,c} \times f_{m,d}} \leq 1, \quad (1)$$

где  $\sigma_{c,0,d} = N_d / A_{inf}$  – расчётное напряжение сжатия;

$f_{c,0,d}$  – расчётное сопротивление сжатию вдоль волокон, определяемое согласно п.б.1.4.1 и п.б.1.4.4 [1];

$\sigma_{m,d} = M_d / W_d$  – расчётное напряжение изгиба;

$f_{m,d}$  – расчётное сопротивление изгибу, определяемое с учетом п.б.1.4.1 и п.б.1.4.4 [1];

$k_{m,c}$  – коэффициент, учитывающий увеличение напряжений при изгибе от действия продольной силы, определяемый по формуле (7.32) [1];

б) на устойчивость плоской формы деформирования по формуле:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c \times f_{c,0,d}} + \left[ \frac{\sigma_{m,d}}{k_{inst} \times k_{m,c} \times f_{m,d}} \right]^n \leq 1, \quad (2)$$

где  $n=2$  – показатель степени для элементов без закрепления растянутой зоны из плоскости деформирования;

$k_c$  – коэффициент продольного изгиба, определяемый по формуле (7.14) [1], для участка длиной ( $l_m$ ) между закреплениями;

$k_{inst}$  – коэффициент, определяемый по формуле (7.24) [1];

$k_{m,c}$  – коэффициент, определяемый по формуле (7.32) [1].

Расчеты, выполненные по формулам (1) и (2) показали, что, даже зная все геометрические характеристики поперечного сечения панелей разрезного пояса сегментной фермы и

расчетные сопротивления используемой древесины, с первого раза определить оптимальную высоту поперечного сечения элемента практически невозможно.

Для снижения числа расчетов при подборе (оптимизации) высоты поперечного сечения верхнего пояса сегментной фермы, авторами статьи предлагается следующая методика.

### ПРЕДЛАГАЕМАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Выполненные по формулам (1) и (2) расчеты сегментных ферм пролетом 12...36 м, позволили выявить основные параметры, которые необходимо учитывать при расчете деревянных сжато-изогнутых элементов на прочность и устойчивость.

Анализ выполненных расчетов по определению высоты поперечного сечения панелей разрезного верхнего пояса сегментных ферм позволил установить, что при расчете деревянных сжато-изогнутых элементов на прочность и устойчивость целесообразно применить следующую схему при разграничении параметров.

За неизменяемые параметры принять:

а) « $b$ » в см – ширину поперечного сечения верхнего пояса, приняв ее с учетом опирания плит покрытия, сортамента пиломатериалов (прил. Б, табл. Б.1 [1]) и острожки досок по кромкам равной следующим значениям: 11,5 см; 14,0 см и 16,5 см;

б) « $f_{c,0,d}$ » – расчётное сопротивление древесины сжатию вдоль волокон, для удобства расчета, как минимально возможное значение:  $f_{c,0,d} = 10 \text{ МПа} = 1 \text{ кН/см}^2$ ;

в) « $l_{max}$ » – предельную длину панели верхнего пояса, с учетом 100% охвата расчетных случаев, принять: 600 см; 650 см и 750 см.

За варьируемые параметры принять:

а) « $N_d$ » в кН – значение расчетной силы (рассматривается в диапазоне, охватывающем не менее 95% расчетных сочетаний нагрузки);

б) « $k = N_d / M_d$ » в  $\text{м}^{-1}$  – соотношение силы и изгибающего момента, охватывает диапазон не менее 95% расчетных случаев при учете снеговой нагрузки.

На основании выполненных расчетов по формулам (1) и (2) составлены таблицы (табл. 1...3), в которых представлены рекомендуемые значения высоты поперечного сечения панелей разрезного верхнего пояса сегментной фермы с учетом действующих усилий.

Разработанная методика позволяет выполнять корректировку (оптимизацию) высоты поперечного сечения верхнего пояса сегментной фермы, определенной по таблицам 1...3, с использованием коэффициентов  $K1$  и  $K2$ .

Коэффициент  $K1$  предназначен для корректировки высоты поперечного сечения панели верхнего пояса фермы при величине расчётного сопротивления древесины сжатию вдоль волокон превышающей  $1 \text{ кН/см}^2$ . Численные значения коэффициента  $K1$  определяются по графикам, приведенным на рисунках 1...3, на которых:  $f$  – расчётное сопротивление древесины сжатию вдоль волокон в  $\text{кН/см}^2$ ;  $k$  – соотношение силы и изгибающего момента в  $\text{м}^{-1}$ .

**Черноиван Николай Вячеславович**, доцент каф. строительных конструкций Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

**Таблица 1.** Рекомендуемые значения высоты поперечного сечения панелей верхнего пояса  $h$  в см при  $b=11,5$  см,  $f_{c,0,d}=1$  кН/см<sup>2</sup>,  $I_{max}=600$  см

Значение силы $N_d$ , кН	Соотношение силы и изгибающего момента $k=N_d/M_d$ , м <sup>-1</sup>						
	4	6	8	10	15	20	30
30,0	24,4	21,7	20,3	19,4	18,2	17,6	16,9
60,0	33,9	29,8	27,6	26,1	24,1	23,1	22,0
90,0	41,5	36,2	33,3	31,4	28,8	27,3	25,8
120,0	48,1	41,9	38,4	36,1	32,8	31,0	<u>29,1</u> 29,5
150,0	54,1	47,0	43,0	40,4	<u>36,5</u> 37,5	<u>34,4</u> 36,9	<u>32,1</u> 36,4
180,0	59,7	51,8	47,3	<u>44,3</u> 46,0	<u>40,0</u> 44,5	<u>37,6</u> 44,0	<u>34,9</u> 43,5
210,0	65,0	<u>56,3</u> 57,2	<u>51,4</u> 54,6	<u>48,2</u> 53,2	<u>43,3</u> 51,7	<u>40,6</u> 51,1	<u>37,6</u> 50,7
240,0	<u>70,0</u> 71,5	<u>60,7</u> 64,9	<u>55,3</u> 62,0	<u>51,8</u> 60,5	<u>46,6</u> 59,0	<u>43,6</u> 58,4	<u>40,3</u> 57,9
270,0	<u>74,8</u> 80,0	<u>64,9</u> 72,6	<u>59,2</u> 69,5	<u>55,4</u> 67,9	<u>49,7</u> 66,2	<u>46,5</u> 65,6	<u>42,9</u> 65,1
300,0	<u>79,4</u> 88,5	<u>68,9</u> 80,4	<u>62,9</u> 77,0	<u>58,8</u> 75,3	<u>52,8</u> 73,5	<u>49,3</u> 72,8	<u>45,4</u> 72,3
330,0	<u>83,9</u> 97,1	<u>72,9</u> 88,2	<u>66,5</u> 84,6	<u>62,2</u> 82,7	<u>55,8</u> 80,8	<u>52,1</u> 80,1	<u>48,0</u> 79,6
360,0	<u>88,3</u> 105,7	<u>76,7</u> 96,1	<u>70,0</u> 92,1	<u>65,5</u> 90,2	<u>58,8</u> 88,1	<u>54,9</u> 87,3	<u>50,5</u> 86,8
390,0	<u>92,5</u> 114,3	<u>80,5</u> 103,9	<u>73,5</u> 99,7	<u>68,8</u> 97,6	<u>61,7</u> 95,4	<u>57,7</u> 94,6	<u>53,0</u> 94,0
420,0	<u>96,7</u> 122,9	<u>84,2</u> 111,8	<u>76,9</u> 107,3	<u>72,0</u> 105,0	<u>64,7</u> 102,7	<u>60,4</u> 101,9	<u>55,6</u> 101,2
450,0	<u>100,8</u> 131,5	<u>87,8</u> 119,7	<u>80,2</u> 114,9	<u>75,2</u> 112,5	<u>67,6</u> 110,0	<u>63,2</u> 109,1	<u>58,1</u> 108,5

**Таблица 2.** Рекомендуемые значения высоты поперечного сечения панелей верхнего пояса  $h$  в см при  $b=14,0$  см,  $f_{c,0,d}=1$  кН/см<sup>2</sup>,  $I_{max}=650$  см

Значение силы $N_d$ , кН	Соотношение силы и изгибающего момента $k=N_d/M_d$ , м <sup>-1</sup>						
	4	6	8	10	15	20	30
50,0	28,7	25,6	23,9	22,8	21,4	20,6	19,9
100,0	40,1	35,3	32,6	30,9	28,5	27,2	25,9
150,0	49,3	43,0	39,6	37,3	34,1	32,4	30,5
200,0	57,3	49,9	45,7	43,0	39,1	36,9	34,6
250,0	64,6	56,2	51,4	48,3	43,7	41,1	<u>38,3</u> 39,6
300,0	71,4	62,1	56,8	53,3	<u>48,1</u> 48,3	<u>45,1</u> 47,7	<u>41,9</u> 47,2
350,0	77,9	67,8	61,9	58,1	<u>52,3</u> 56,0	49,0 55,4	45,4 55,0
400,0	84,1	73,2	66,9	<u>62,7</u> 65,4	<u>56,4</u> 63,8	<u>52,8</u> 63,2	<u>48,8</u> 62,8
450,0	90,1	78,4	<u>71,7</u> 74,9	<u>67,2</u> 73,3	<u>60,5</u> 71,7	<u>56,6</u> 71,0	<u>52,2</u> 70,6
500,0	95,8	<u>83,5</u> 86,3	<u>76,4</u> 83,0	<u>71,6</u> 81,3	<u>64,4</u> 79,5	<u>60,3</u> 78,9	<u>55,6</u> 78,4
550,0	<u>101,4</u> 103,3	<u>88,5</u> 94,6	<u>81,0</u> 91,1	<u>76,0</u> 89,3	<u>68,4</u> 87,4	<u>64,0</u> 86,7	<u>59,0</u> 86,2
600,0	<u>106,9</u> 112,3	<u>93,3</u> 103,0	<u>85,5</u> 99,2	<u>80,2</u> 97,3	<u>72,3</u> 95,3	<u>67,7</u> 94,6	<u>62,5</u> 94,0
650,0	<u>112,2</u> 121,4	<u>98,1</u> 111,4	<u>89,9</u> 107,3	<u>84,4</u> 105,3	<u>76,2</u> 103,2	<u>71,4</u> 102,4	<u>65,9</u> 101,9
700,0	<u>117,4</u> 130,6	<u>102,8</u> 119,8	<u>94,3</u> 115,5	<u>88,6</u> 113,3	<u>80,0</u> 111,1	<u>75,1</u> 110,3	<u>69,4</u> 109,7
750,0	<u>122,6</u> 139,7	<u>107,4</u> 128,2	<u>98,6</u> 123,6	<u>92,7</u> 121,3	<u>83,8</u> 119,0	<u>78,7</u> 118,1	<u>72,9</u> 117,5

Таблица 3. Рекомендуемые значения высоты поперечного сечения панелей верхнего пояса  $h$  в см при  $b=16,5$  см,  $f_{c,0,d}=1$  кН/см<sup>2</sup>,  $l_{max}=750$  см

Значение силы $N_d$ , кН	Соотношение силы и изгибающего момента $k=N_d/M_d$ , м <sup>-1</sup>						
	4	6	8	10	15	20	30
70,0	32,2	28,9	27,1	26,0	24,5	23,7	22,9
125,0	42,3	37,5	34,9	33,3	31,0	29,8	28,5
180,0	50,7	44,7	41,4	39,2	36,2	34,6	32,9
235,0	58,2	51,1	47,1	44,6	40,9	38,9	36,7
290,0	65,0	57,0	52,4	49,5	45,2	42,8	40,2
345,0	71,4	62,5	57,4	54,1	49,2	46,5	<u>43,6</u> 44,4
400,0	77,5	67,8	62,2	58,5	53,1	<u>50,1</u> 51,7	<u>46,8</u> 51,2
455,0	83,3	72,8	66,8	62,8	<u>56,9</u> 59,1	<u>53,6</u> 58,5	<u>49,9</u> 58,1
510,0	88,9	77,7	71,3	<u>67,0</u> 67,4	<u>60,7</u> 66,0	<u>57,1</u> 65,4	<u>53,0</u> 65,0
565,0	94,3	82,5	<u>75,7</u> 75,8	<u>71,1</u> 74,4	<u>64,3</u> 73,0	<u>60,5</u> 72,4	<u>56,1</u> 72,0
620,0	99,6	87,1	<u>79,9</u> 82,9	<u>75,2</u> 81,4	<u>68,0</u> 80,0	<u>63,9</u> 79,4	<u>59,2</u> 79,0
675,0	104,7	<u>91,7</u> 92,9	<u>84,1</u> 90,0	<u>79,1</u> 88,5	<u>71,6</u> 87,0	<u>67,2</u> 86,4	<u>62,3</u> 86,0
730,0	109,7	<u>96,1</u> 100,2	<u>88,3</u> 97,1	<u>83,0</u> 95,6	<u>75,1</u> 94,0	<u>70,6</u> 93,4	<u>65,4</u> 93,0
785,0	<u>114,6</u> 115,7	<u>100,5</u> 107,6	<u>92,4</u> 104,3	<u>86,9</u> 102,7	<u>78,7</u> 101,0	<u>74,0</u> 100,4	<u>68,5</u> 100,0
840,0	<u>119,5</u> 123,5	<u>104,9</u> 114,9	<u>96,4</u> 111,5	<u>90,8</u> 109,8	<u>82,2</u> 108,0	<u>77,3</u> 107,4	<u>71,7</u> 106,9

Примечание: В таблицах 1...3 принята следующая запись: над чертой записаны значения высоты поперечного сечения, полученные из условия прочности; под чертой – значения, полученные из условия устойчивости с учетом раскрепления панелей по концам и в середине.

Корректировка осуществляется следующим образом: делением табличного значения высоты поперечного сечения верхнего пояса (табл. 1...3) на поправочный коэффициент  $K_f$ , который вычисляется по следующим выражениям:

а).  $K_{f,1} = (\sqrt{f_{c,0,d}} \times K1)$ , где коэффициент  $K1$  выбирается по графикам (рис. 1...3) для высоты поперечного сечения, определенной из условия прочности;

б).  $K_{f,2} = (f_{c,0,d} \times 0,98)$  – для высоты поперечного сечения, определенной из условия обеспечения устойчивости с учетом раскрепления панелей по концам и в середине.

**Коэффициент  $K2$**  предназначен для корректировки высоты поперечного сечения верхнего пояса фермы при длине панели пояса в интервале: 405...680 см. Численные значения коэффициента  $K2$  определяются по графикам, приведенным на рисунках 4...6, на которых:  $l$  – длины панели верхнего пояса фермы в см;  $k$  – соотношение силы и изгибающего момента в м<sup>-1</sup>.

Корректировка осуществляется следующим образом: делением табличного значения высоты поперечного сечения верхнего пояса фермы (табл. 1...3) на поправочный коэффициент  $K_l$ , который вычисляется по следующим выражениям:

а).  $K_{l,1} = K2$ , где коэффициент  $K2$  определяется по графикам (рис. 4...6) для высоты поперечного сечения, определенной из условия прочности;

б).  $K_{l,2} = ((l_{max}/l)^2 \times K3)$  – для высоты поперечного сечения, определенной из условия обеспечения устойчивости с учетом раскрепления панелей по концам и в середине.

Коэффициент  $K3$  принимается равным: **0,94...0,98** – для значений из таблицы 1; **0,97...0,99** – для значений из таблицы 2 и **0,99** – для значений из таблицы 3. При этом минимальное

значение коэффициента  $K3$  соответствует значению, определенному при максимальной силе  $N_d$  и минимальном  $k$ .

Рекомендуется при выборе значений коэффициентов  $K1$  и  $K2$  в запас прочности принимать минимальное их значение, т.е. округлять заданные характеристики в представленных на графиках диапазонах таким образом, чтобы выбранная ломаная в принятой точке оказалась ниже других.

Рассмотрим последовательность, определения высоты поперечного сечения панелей разрезного верхнего пояса сегментной фермы по предлагаемой методике на примере.

На основании статического расчета определяются численные значения расчетной силы  $N_d$ , кН и расчетного изгибающего момента  $M_d$ , кН×м. Из разработанной геометрической схемы фермы определяется длина панели верхнего пояса. Исходя из величины расчетных нагрузок ( $N_d$  и  $M_d$ ) и предельной гибкости самого длинного раскоса назначается ширина сечения верхнего пояса « $b$ » в см. Затем определяется соотношение силы и изгибающего момента:  $k=N_d/M_d$  в м<sup>-1</sup>.

С учетом используемой породы древесины и ее сорта определяется с учетом [1] расчетное сопротивление древесины сжатию вдоль волокон  $f_{c,0,d}$  в кН/см<sup>2</sup>.

На основании полученных исходных данных приступают к подбору высоты поперечного сечения верхнего пояса.

Проиллюстрируем изложенное выше на конкретном числовом примере:  $N_d=367,9$  кН;  $M_d=70,8$  кН×м;  $k=5,2$  м<sup>-1</sup>;  $l=587,4$  см;  $b=14,0$  см;  $f_{c,0,d}=1,5$  кН/см<sup>2</sup>.

Выполнив интерполяцию по соответствующим значениям  $N_d$  и  $k$  таблицы 2, получаем при  $f_{c,0,d}=1$  кН/см<sup>2</sup> и  $l_{max}=650$  см высоту поперечного сечения  $h=73,9$  см.

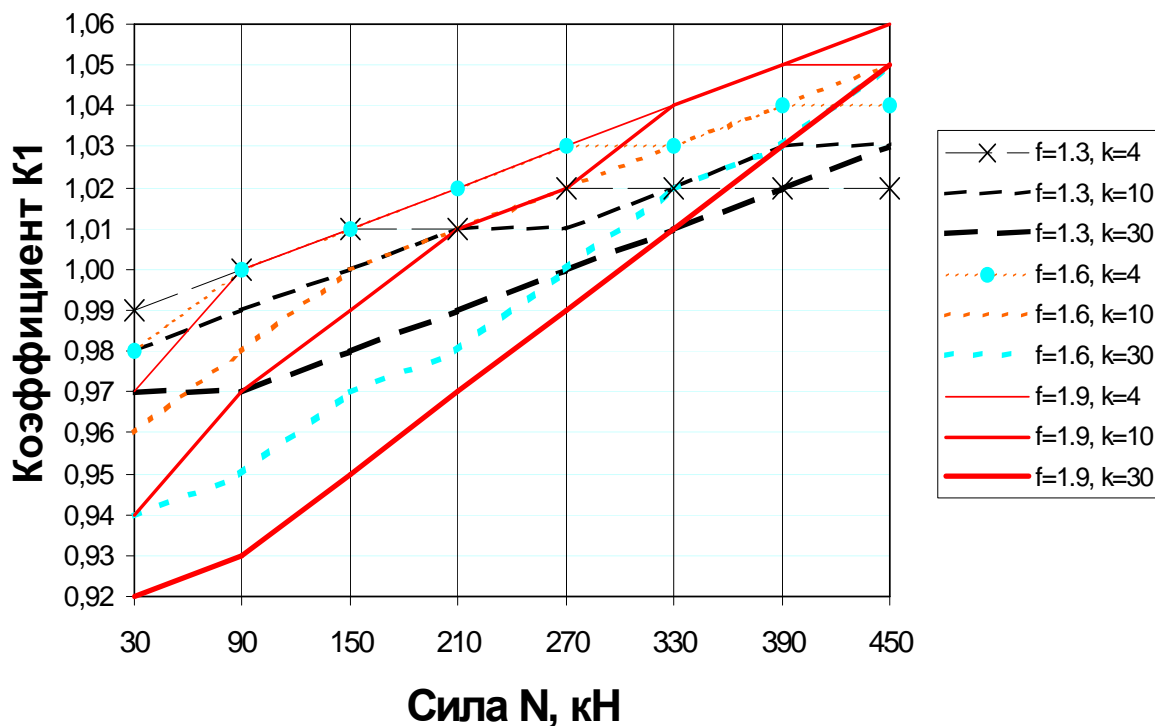


Рис. 1. Коэффициент  $K1$  к таблице 1.

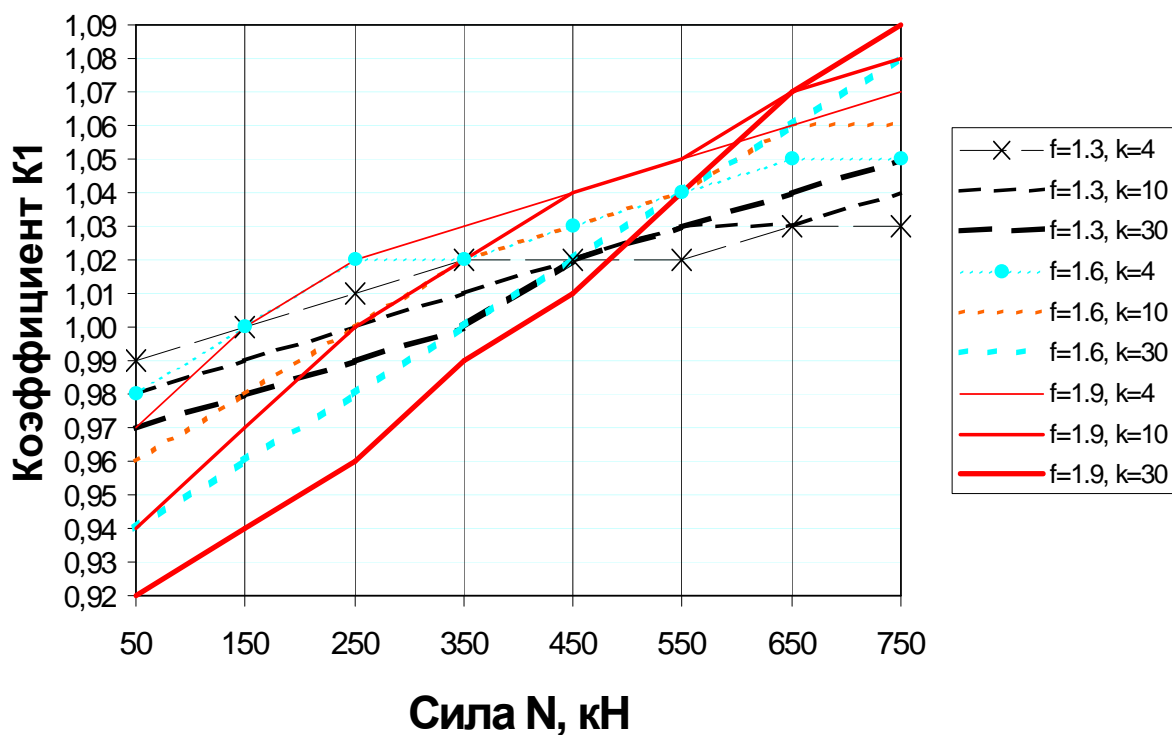


Рис. 2. Коэффициент  $K1$  к таблице 2.

Учитывая, что численные значения  $f_{c,0,d}$  и  $l_{max}$  в таблице 2 отличаются от исходных значений этих параметров, выполним корректировку высоты поперечного сечения верхнего пояса с использованием коэффициентов  $K1$  и  $K2$ .

Приняв  $N_d=350$  кН,  $k=10$  м,  $f_{c,0,d}=1,3$  кН/см<sup>2</sup> и  $l=600$  см по графикам на рисунках 2 и 5 находим:  $K1=1,01$  и  $K2=1,01$ .

Тогда откорректированная высота поперечного сечения верхнего пояса составит:  $h_d=h/(K_{f,1} \times K_{l,1})=$

$$=h/(\sqrt{f_{c,0,d}} \times K1 \times K2)=73,9/(\sqrt{1,5} \times 1,01 \times 1,01)=59,2$$

см. Вычисленное на ЭВМ значение  $h_d$  составляет 57,7 см, т.е. запас прочности не превышает 2,6%. Так как принятое  $h_d=59,2$  см > 50 см, то в соответствии с п. 6.1.4.4.3 [1] в расчетное сопротивление сжатию вводится понижающий коэффициент  $k_h$ .

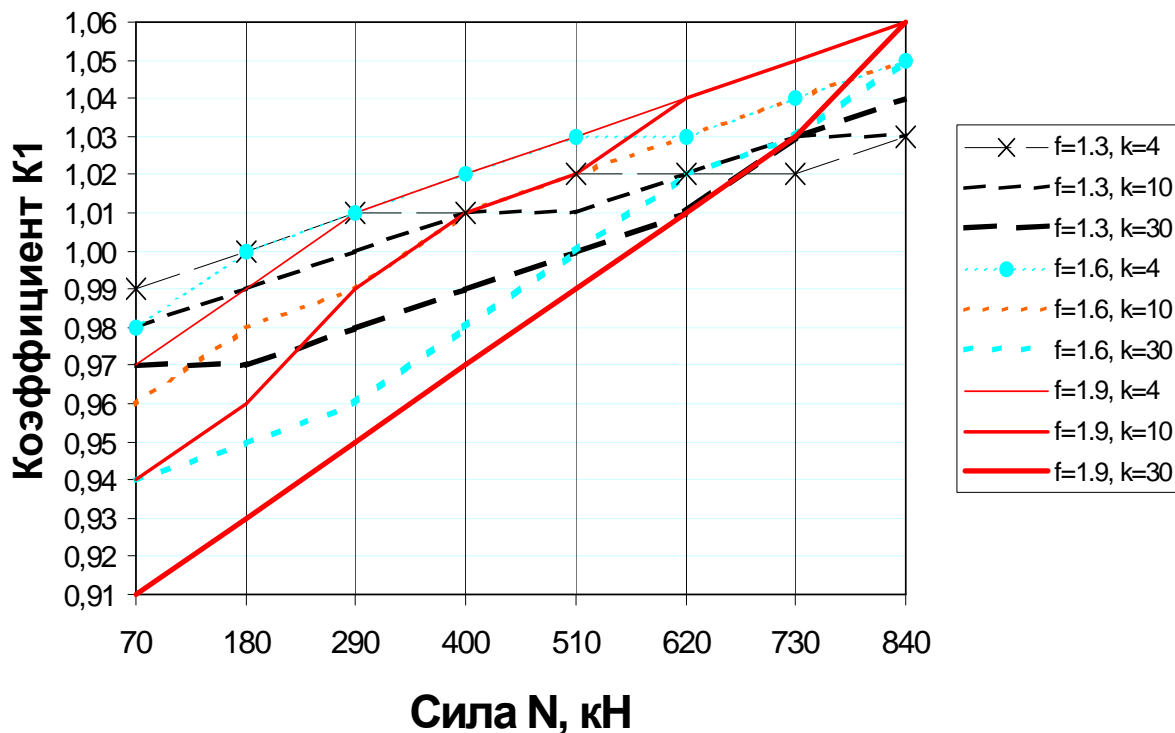


Рис. 3. Коэффициент  $K1$  к таблице 3.

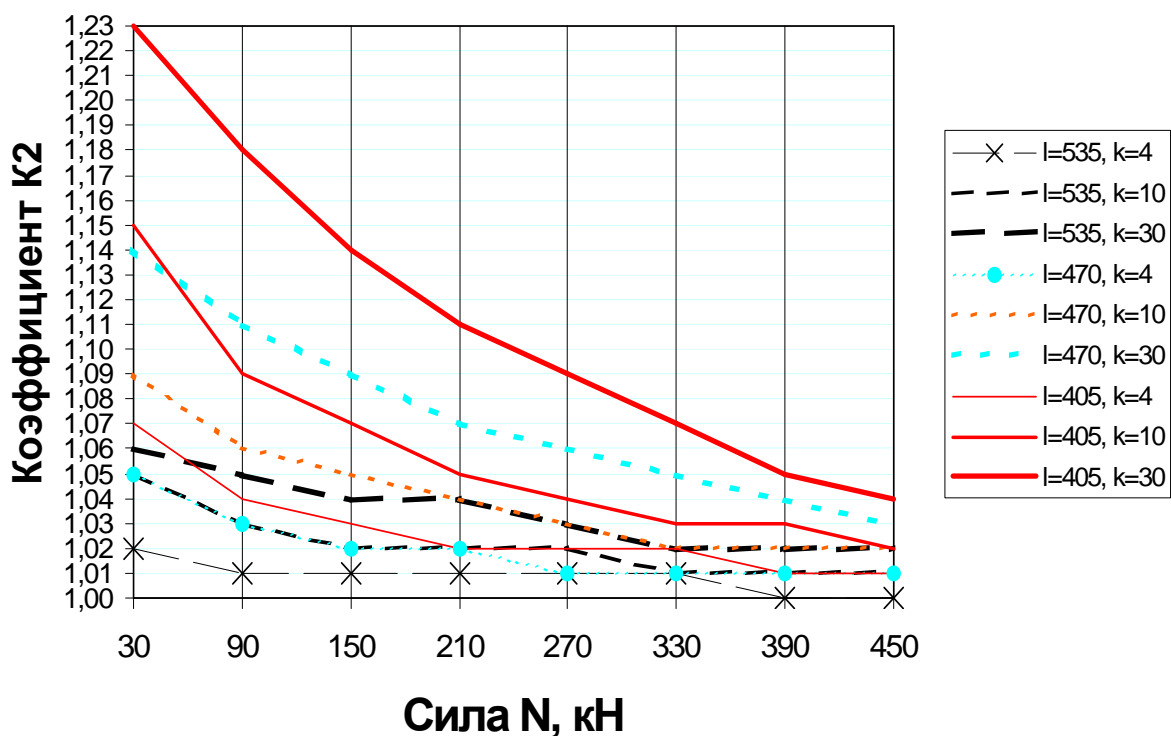


Рис. 4. Коэффициент  $K2$  к таблице 1.

С учетом всех коэффициентов высота поперечного сечения верхнего пояса фермы равна:

$$h_{d,h} = h_d / \sqrt{k_h} = 59,2 / \sqrt{0,96} = 60,4 \text{ см.}$$

Вычисленное на ЭВМ значение  $h_{d,h}$  составляет 59,0 см, т.е. запас прочности не превышает 2,4%. Следовательно, предлагаемая методика позволяет с достаточно высокой точностью определять высоту

поперечного сечения сегментных ферм с верхним неразрезным поясом из древесины.

Полученные общие закономерности (табл. 1...3, рис.1...6) позволяют использовать их и для других шарнирно-опёртых сжато-изгибаемых деревянных элементов, удовлетворяющих указанным выше условиям.

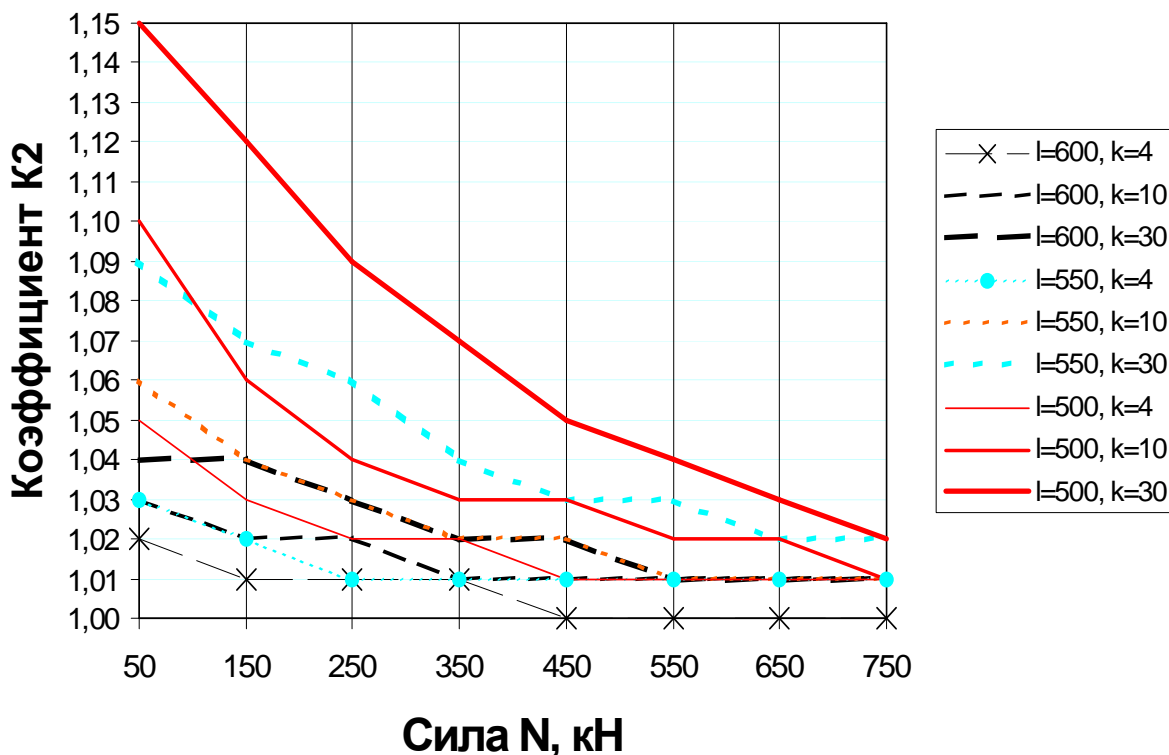


Рис. 5. Коэффициент  $K_2$  к таблице 2.

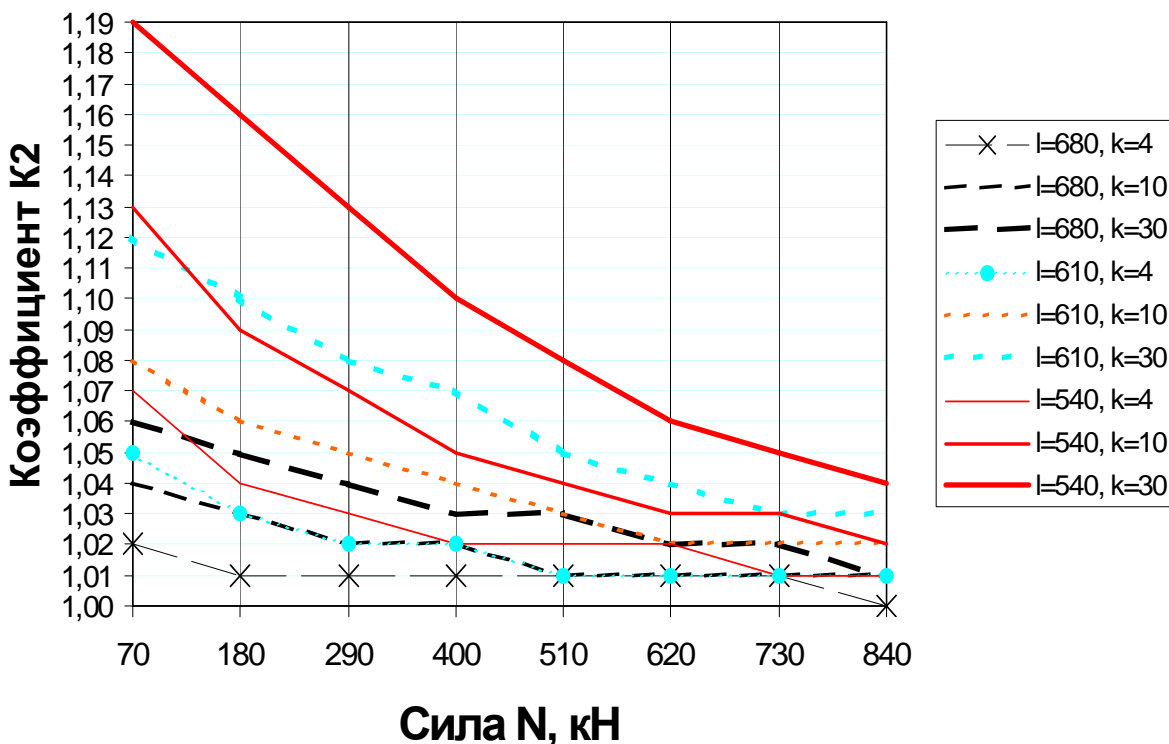


Рис. 6. Коэффициент  $K_2$  к таблице 3.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. СНБ 5.05.01-2000. Деревянные конструкции / Минстройархитектуры РБ.-Мн.: РУП «Минсктипроект», 2001. – 72 с.
2. Гринь И.М. Строительные конструкции из дерева и синтетических материалов. Проектирование и расчет: Учеб.

пособие для строительных вузов и ф-тов. – 2-е изд., перераб. и доп. Киев – Донецк: Вища школа, Головное изд-во, 1979. – 272 с.