

УДК 624.011

к.т.н., доцент Михайловский Д.В., Матющенко Д.Н.,  
Киевский университет строительства и архитектуры

## ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ГНУТОКЛЕЁНЫХ РАМ ИЗ КЛЕЁНОЙ ДРЕВЕСИНЫ

*Рассмотрены основные методики расчета гнутоклееных рам. Проведен анализ и сравнение методик с классической теорией сопротивления материалов. Приведены графики сравнения методов определения напряжений в карнизном узле гнутоклееных рам с различными радиусами кривизны на примере рам промышленного здания пролетом 12, 15 и 21 м.*

*Ключевые слова: гнутоклееные рамы, клееная древесина, методики расчета, карнизный узел.*

Методики расчета гнутоклееных рам из клееной древесины несколько ограничены. В 70-е годы в нормативных документах не содержалось указаний для расчета гнутоклееных рам. Лишь после выхода руководства по проектированию клееных конструкций [1] некоторые указания нашли свое отражение в СНиП II-25-80 [2]. Однако содержащиеся там рекомендации дают довольно приблизительное представление о действительном напряженном состоянии карнизного узла гнутоклееной рамы.

Проверка прочности прямолинейных участков рам выполнялась с помощью формул сложного сопротивления (формулы (1) и (2)), а вот проверки максимальных радиальных напряжений в криволинейных участках вообще предусмотрено не было. Формулы (1) и (2) учитывающие работу элементов на сжатие с изгибом, базируются на линейном распределении напряжений и для криволинейных элементов отличаются лишь введением поправочных коэффициентов  $k_{rn}$  и  $k_{rg}$  к моментам сопротивления сечения. Эти коэффициенты учитывают влияние кривизны на величину краевого напряжения и применяются для гнутоклееных рам с соотношением  $h/r \geq 1/7$ .

Расчет на прочность сжато-изгибаемых элементов, с учетом поправочных коэффициентов  $k_{rn}$  и  $k_{rg}$ :

- проверка напряжений по внешней кромке:

$$\sigma_p = \frac{N}{F} + \frac{M_d}{W \cdot k_{rn}} \leq R_p, \text{ где ; } k_{rn} = \frac{1 - 0,5h/r}{1 - 0,17h/r} \quad (1)$$

- проверка напряжений по внутренней кромке:

$$\sigma_c = \frac{N}{F} + \frac{M_d}{W \cdot k_{rg}} \leq R_c, \text{ где } k_{rg} = \frac{1 + 0,5h/r}{1 + 0,17h/r} \quad (2)$$

Расчетный изгибающий момент  $M_D$ , учитывающий деформированную схему элемента:

$$M_D = \frac{M}{\xi}; \quad \xi = 1 - \frac{N}{\varphi R_c F_{бр}}; \quad (3)$$

где  $M$  – изгибающий момент в расчетном сечении без учета деформированной схемы элемента;  $\varphi$  – коэффициент продольного изгиба;  $N$  – продольная сила;  $h$  – высота сечения;  $r$  – радиус кривизны центральной оси криволинейного участка;  $F$  – расчетная площадь сечения;  $W$  – расчетный момент сопротивления сечения;  $R_p, R_c$  – расчетные сопротивления древесины растяжению и сжатию вдоль волокон, соответственно;  $\xi$  – коэффициент, учитывающий дополнительный момент в деформированной схеме;  $k_{гн}$  и  $k_{гв}$  – поправочные коэффициенты.

Данная методика вызывает сомнения относительно оценки прочности, так как не учитывает характер распределения напряжений по высоте сечения. Как известно, для клееной древесины характерна резко выраженная анизотропия упругих и прочностных характеристик. Впервые на неравномерность учета дополнительного момента с помощью коэффициента  $\xi$  в расчетах гнутоклееных рам было обращено внимание при проведении исследования в Санкт-Петербургском университете строительства и архитектуры [3]. Проф. Серовым Е.М. доказано на примере расчета и испытания клефанерных рам, что дополнительный момент в деформированной схеме, определяемый по формуле (3), приводит к значительному завышению расчетных усилий (до 20%) и может применяться только для прямолинейных элементов [4, 5, 6].

В работе Кузнецовой Н.М. [7, 8] предложены аппроксимирующие формулы для определения тангенциальных (4) и максимальных радиальных (5) напряжений в криволинейном участке:

$$\sigma_{\theta H} = \frac{M}{W} K_{\theta H}; \quad \sigma_{\theta B} = \frac{M}{W} K_{\theta B}; \quad (4)$$

$$\sigma_r^{\max} = \frac{M}{W} K_r^{\max}; \quad \text{где} \quad K_r^{\max} = 0,25 \frac{h}{r_0}. \quad (5)$$

$$K_{\theta H} = 0,57 \left( \frac{h}{r_0} \right) - 0,37 \left( \frac{h}{r_0} \right) + 1; \quad K_{\theta B} = \begin{cases} 1 + 0,5 \frac{h}{r_0} \rightarrow \text{при } \frac{h}{r_0} \leq 0,4 \\ 0,83 + 0,9 \frac{h}{r_0} \rightarrow \text{при } \frac{h}{r_0} > 0,4 \end{cases}.$$

В приведенных выше формулах рассмотрена лишь зона биссектрисного угла карнизного узла.

В пособии к СНиП II-25-80 [9], которое вышло в 1986 году предложена несколько иные формулы для определения тангенциальных (6) и максимальных радиальных (7) напряжений при соотношении радиуса кривизны к высоте поперечного сечения элемента  $r/h \leq 7$  (элементы большой кривизны, к которым относятся и карнизные узлы гнутоклееных рам):

$$\sigma_{\theta i} = \frac{M(r_0 - r_i)}{(Fz_0 r_i)}; \quad (6)$$

$$\sigma_{r, \max} = \frac{M}{(Fz_0)} \left[ \frac{r_0}{r_1} - 1 - \ln \frac{r_0}{r_1} \right]; \quad (7)$$

где  $r_0 = r - z_0$ ;  $F = bh$ ;  $r_1 = r - h/2$ ;  $z_0 = h^2/12r$ ;  $\sigma_{\theta i}$  – нормальные напряжения в различных слоях сечения;  $\sigma_{r, \max}$  – максимальное радиальное напряжение;  $M$  – расчетный изгибающий момент;  $r_0$  – радиус кривизны нейтрального слоя;  $r_1$  – радиус кривизны нижней кромки кривого бруса;  $F$  – площадь поперечного сечения кривого бруса;  $z_0$  – смещения нейтральной оси от геометрической оси криволинейного участка,  $z_0 = I/(Fr)$ ;  $I$  – момент инерции сечения;  $r$  – радиус кривизны криволинейного участка;  $h$  – высота сечения кривого бруса.

Точное решение задачи Головина С.Х. [10] (методика расчета кривого бруса по классической теории сопротивления материалов) для прямоугольного сечения записывается следующим образом:

- нормальные напряжения, действующие в плоскости сечения:

$$\sigma_{\theta} = \frac{4M}{k} \left( b^2 - a^2 - a^2 \ln \frac{r}{a} - b^2 \ln \frac{b}{r} - \frac{a^2 b^2}{r^2} \ln \frac{b}{a} \right); \quad (8)$$

- радиальные напряжения, действующие в плоскости сечения:

$$\sigma_r = \frac{4M}{k} \left( \frac{a^2 \cdot b^2}{r^2} \cdot \ln \frac{b}{a} - b^2 \cdot \ln \frac{b}{r} - a^2 \cdot \ln \frac{r}{a} \right); \quad (9)$$

где  $k = (b^2 - a^2)^2 - 4 \cdot a^2 \cdot b^2 \cdot [\ln(b/a)]^2$ ; в которой,  $\sigma_{\theta}$  – нормальное напряжение, действующее в плоскости сечения;  $\sigma_r$  – нормальное напряжение, которое является следствием нажатия продольных элементов друг на друга;  $M$  – изгибающий момент;  $k$  – постоянный коэффициент интегрирования;  $a$  – внутренний радиус кривого бруса;  $b$  – внешний радиус кривого бруса;  $r$  – радиус нейтральной оси кривого бруса.

В учебном пособии под редакцией Серова Е.Н. [11] и работе Найчука А.Я. [12] предлагается оценивать прочность жестких узлов рам с криволинейными участками по следующим формулам:

- в сжатой зоне:

$$\sigma_c = \frac{N_{yз}}{F} + \frac{M_{\partial,yз}(r_0 - r_1)}{F \cdot y_0 \cdot r_1} ; \quad (10)$$

- в растянутой зоне:

$$\sigma_p = \frac{M_{\partial,yз}(r_2 - r_0)}{F \cdot y_0 \cdot r_2} - \frac{N_{yз}}{F} ; \quad (11)$$

- максимальные радиальные напряжения:

$$\sigma_r = \frac{N \cdot \ln\left(\frac{r_0}{r_1}\right)}{F} + \frac{M_{\partial,yз} \left[ \frac{r_0}{r_1} - 1 - \ln\left(\frac{r_0}{r_1}\right) \right]}{F \cdot y_0} ; \text{ где } y_0 = z_0 = h^2/12r \quad (12)$$

В последнем нормативном документе по проектированию деревянных конструкций в Украине ДБН В.2.6-161: 2010 [13], который фактически содержит положения EN1995-1-1 [14], формул для расчета рамных конструкций нет. В [13, 14] содержатся только формулы для расчета криволинейных балок. В отличие от большинства балок с криволинейным участком, где радиальные напряжения  $\sigma_r$  растягивают древесину поперек волокон, в карнизных узлах гнутоклееных рам они сжимающие. Правомерность применения формул для расчета карнизных узлов вызывает много вопросов, и не применима к расчету карнизного узла гнутоклеёной рамы. Также проведен расчет гнутоклеёных рам в ПК ЛИРА 9.6 с использованием анализа МКЭ (метод конечных элементов) в плоской постановке были проведены численные исследования пластинчатыми элементами типа 44 и 42 (универсальный четырехугольный и треугольный конечные элементы (КЭ) оболочки). В опорном узле было смоделировано передачу поперечного и вертикального усилия на металлический башмак с помощью конечного элемента типа 262 (конечный элемент упругой связи между двумя узлами). Конечным элементам были предоставлены такие ортогонально-анизотропные (ортотропные) характеристики, а именно:

- Модуль упругости вдоль волокон –  $E_1=10\,000$  МПа;
- Модуль упругости поперек волокон –  $E_2=400$  МПа;
- Модуль сдвига –  $G=500$  МПа
- Коэффициенты Пуассона –  $\nu_1=0,019$ ;  $\nu_2=0,48$ .
- Плотность  $R_0=4,905$  кН/м<sup>3</sup>.

Опорный узел состоит из пластинчатых элементов типа 44 и односторонних связей типа 262 с такими изотропными характеристиками:

- Модуль упругости –  $E=206000$  МПа
- Коэффициенты Пуассона –  $\nu=0,3$ .
- Плотность  $R_0=78,5$  кН/м<sup>3</sup>.

Работа упругой связи на сжатие с численным значением жесткости –  $R=1500$  кН/м.

Проведя анализ вышеупомянутых методик расчета напряжений на примере гнутоклееных рам промышленного здания пролетами 12, 15, 21 м, с шагом рам 6 м с различными радиусами кривизны и уклоном ригеля 1:4. Все исходные данные приведены в таблице 1, а расчетные схемы представлены на рисунке 1.

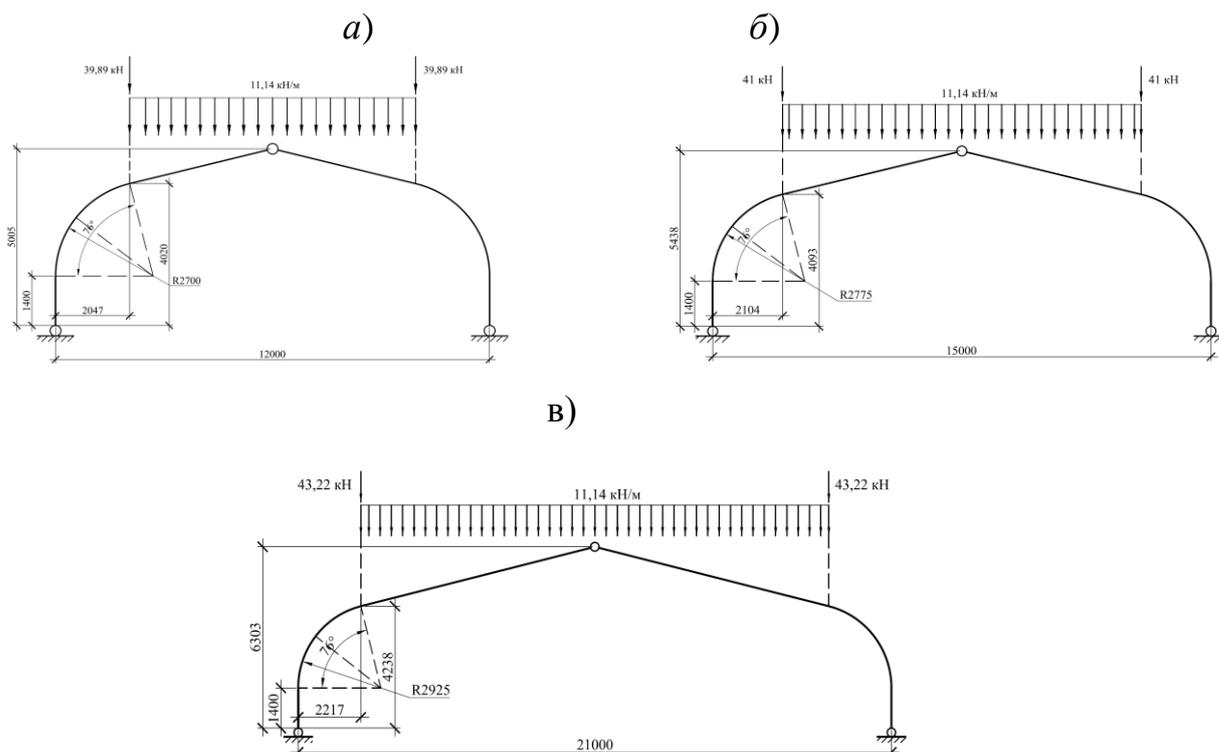


Рис 1. Расчетные схемы: а) ГРК-12-2700; б) ГРК-15-2775; в) ГРК-21-2925.

Таблица №1. Исходные данные.

Марка рамы	Расчетн. нагрузка, кН/м	Сечение в карн. узле, (b×h), мм	Радиус кривизны, мм	$r_0/h$	Максимальные внутренние усилия в карнизном узле	
					M, мНм	N, мН
ГРК-12-2700	11,14	160×592	2700	4,56	-0,114	-0,1
ГРК-15-2775		160×688	2775	4,03	-0,16	-0,125
ГРК-21-2925		160×896	2925	3,26	-0,27	-0,177

Значения напряжений  $\sigma_c$ ,  $\sigma_p$ ,  $\sigma_r$ , полученные по классической теории сопротивления материалов (решение задачи Головина С.Х.) очень близки к значениям, которые получены при численных исследованиях с помощью ПК ЛИРА 9.6, исходя из этого классическую методику сопротивления материалов

можно выделить как наиболее точную. Наиболее не точной является методика по СНиП II-25-80 [2]. Напряжения определенные по этой методике значительно превышают значения напряжений, сравнивая с классической теорией сопротивления материалов, получаем увеличение напряжений сжатия и растяжения, а именно:  $\sigma_c$  – до 28%,  $\sigma_p$  – до 14%, а радиальные напряжения вообще невозможно рассчитать по этому нормативному документу. Результаты исследований по другим методикам приведены в форме таблицы 2.

Таблица №2. Сравнительный анализ методик расчета напряжений в карнизном узле гнутоклеёных рам пролетами 12, 15 и 21 м.

Марка рамы	Напряжения, мПа	Головин С.Х. (1881)	СНиП II-25-80 (1982)	Кузнецов а Н.М. (1984)	Пособие к СНиП II-25-80 (1986)	Серов Е.Н. (2011)	ПК Лири 9.6
ГРК-12-2700	$\sigma_c$	-11,05	-13,75	-11,40	-13,20	-14,26	-11,3
	$\sigma_p$	9,55	9,92	10,73	11,4	10,34	8,11
	$\sigma_r$	-0,56	-	-0,57	-0,73	-0,84	-0,57
ГРК-15-2775	$\sigma_c$	-11,65	-15,1	-12,01	-13,87	-15,01	-11,6
	$\sigma_p$	9,87	10,7	11,21	11,74	10,61	8,1
	$\sigma_r$	-0,67	-	-0,67	-0,86	-1,01	-0,65
ГРК-21-2925	$\sigma_c$	-11,83	-16,52	-12,26	-14,13	-15,37	-11,9
	$\sigma_p$	9,64	11,23	11,28	11,5	10,26	7,98
	$\sigma_r$	-0,82	-	-0,82	-1,1	-1,29	-0,8

Бесспорно, для обеспечения надежности рамных конструкций из клееной древесины определения точных значений напряжений, с учетом анизотропии физико-механических свойств древесины, является очень важной задачей. Все представленные методики расчета различаются между собой.

Существует насущная необходимость в разработке точной инженерной методики расчета карнизных узлов гнутоклееных рам. Современная методика должна включить в себя не только формулы для более точного определения отдельных напряжений, но и формулы учета СНС, которые должны учитывать сложное напряженное состояние, в котором находится клееная древесина в зоне карнизного узла.

### Библиографический список:

1. Руководство по проектированию клееных деревянных конструкций, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, М.: Стройиздат 1977г. – 192 с.
2. Деревянные конструкции: СНиП II-25-80. – М.: Стройиздат – Госстрой СССР, 1982. – 66с.
3. Светозарова Е.И., Серов Е.Н., Душечкин С.А., Попов В.Д. Опыт проведения испытания клееных рам пролетом 18 м. – В кн.: Повышение надежности и долговечности строительных конструкций: Межвуз. темат. сб. тр. Л.: ЛИСИ, 1972, С. 97-114.
4. Канн Э.А., Серов Е.Н. Деревянные конструкции в современном строительстве. Кишинев: Штиница, 1981. – 180 с.

5. Разработка, исследование и оказание научно-технической помощи во внедрении клееных конструкций с применением водостойкой фанеры и древесины, и древесины различных пород в с/х строительстве УССР: Отчет по научно-исследовательской работе ЛИСИ, науч. руководитель Е.И. Светозарова. т.1 Л.: 1976. – 219 с.
6. Серов Е.Н. Конструкции из дерева и пластмасс: Метод. указания по расчету трехшарнирных деревянных рам по деформированной схеме на ЭЦВМ «Наири-2». Л.: ЛИСИ, 1977. – 51 с.
7. Курганский В.Г., Кузнецова Н.М. Влияние анизотропии на напряженное состояние кривого бруса в случае чистого изгиба. – Тр. ЦНИИСК им. Кучеренко М.: 1981. – С. 148-155.
8. Освенский Б.А., Кузнецова Н.М. Исследование напряженного состояния гнутоклееного деревянного элемента и конструкции. – В кн. Вопросы прочности, долговечности и деформативности древесины и конструкционных пластмасс: Сб. тр. №186 / МИСИ им. Куйбышева М.: 1981. – С.13-18.
9. Пособие по проектированию деревянных конструкций (к СНиП II-25-80) / ЦНИИСК им. Кучеренко. – М. : Стройиздат, 1986. – 216 с.
10. Серов Е.Н. Расчет цельноклееного карнизного узла рамы. Краткие содержания докладов XXVIII научной конференции ЛИСИ. Л.: ЛИСИ, 1970. – С. 161-164.
11. Серов Е.Н. Проектирование деревянных конструкций: учеб. пособие / Е.Н. Серов, Ю.Д. Санников, А.Е. Серов; под. ред. Е.Н. Серова. – М.: Издательство АСВ, 2011. – 236 с.
12. Найчук А.Я., Серов Е.Н., Захаркевич И.Ф. Некоторые особенности расчета клееных деревянные конструкций.: Сб науч.тр. Междунар. Симпозиума – Брест: ОАО «Брестская типография», 2009. – С. 205-211.
13. ДБН В.2.6-161:2010. Конструкції будинків і споруд. Дерев'яні конструкції. Основні положення. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. - С. 34-37.
14. ТКП EN 1995-1-1-2009 (02250) Еврокод 5. Проектирование деревянных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий. С. 29-31.

### **Анотація:**

Розглянуто основні методики розрахунку гнутоклеєних рам. Проведено аналіз і порівняння методик з класичною теорією опору матеріалів. Наведено графіки порівняння методів визначення напружень в карнизному вузлі гнутоклеєних рам з різними радіусами кривизни на прикладі рам промислової будівлі прольотом 12, 15 і 21 м.

Ключові слова: Гнутоклеєні рами, клеєна деревина, методики розрахунку, карнизний вузол.

### **Abstract:**

The basic methods of calculating curved frames of laminated wood.. The analysis and comparison of methods with the classical theory of strength of materials. The graphs compare methods for determining the stresses in the cornice node bent laminated frames with different radius curvature on the example of an industrial building frames span of 12, 15 and 21 m.

Keywords: Laminated wood, curved frames, methods of calculating, cornice node.