

временной рыночной экономики. Разработка современной методики расчета арочных ККД является очень актуальной и важной научной задачей.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Клееные деревянные конструкции в современном строительстве: сб. науч. трудов // О.А. Карунас, К.В. Чернова, И.И. Елькина // Актуальные проблемы архитектуры, строительства и энергосбережения. – Симферополь: НАПКС, 2012. – Вып. 4. – С. 320–324.
2. Найчук, А.Я. Клееная древесина – строительный материал будущего // А.Я. Найчук, С. Васильев // Архитектура и строительство. – № 3. – 2009. – С. 10–15.
3. Калугин, А.В. Деревянные конструкции: учебное пособие (конспект лекций). – М.: Издательство АСВ, 2003. – 224 с.
4. Деревянные конструкции: СНиП II-25-80 / Госстрой СССР – М.: Стройиздат, 1982. – 66 с.
5. Пособие по проектированию деревянных конструкций (к СНиП II-25-80) / ЦНИИСК им. Кучеренко. – М.: Стройиздат, 1986. – 216 с.
6. Клименко, В.С. Конструкции из дерева и пластмасс: учебник / В.С. Клименко – К.: Высшая школа, 2000. – 304 с.
7. Еврокод 5. Проектирование деревянных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для сооружений: ДСТУ-Н Б EN 1995-1-1:2010 – К.: Минрегионстрой, 2010 – 244 с.
8. Конструкции зданий и сооружений. Деревянные конструкции. Основные положения: ДБН В.2.6-161 2010 – К.: Минрегионстрой, 2010 – 102 с.
9. Проектирование деревянных конструкций // Ю.Д. Санников, А.Е. Серов; под. ред. Е.Н. Серова – М.: Издательство АСВ, 2011 – 563 с.
10. Конструкции из цельной и клееной древесины. Руководство по проектированию: ДСТУ-Н Б В.2.6-184 2012. – К.: Минрегионстрой, 2013 – 120 с.
11. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования: ДБН В.1.2-2 2006 – М.: Минстрой Украины, 2006 – 60 с.
12. Деревянные конструкции: СНБ 5.05.01-2000 / Минстройархитектуры. – Минск: Стройтехнорм, 2001. – 70с.
13. Деревянные клееные конструкции. Методы испытаний клеевых соединений при изготовлении: СТО 36554501-004-2006 – Москва, 2006 – 72 с.

УДК 624.011

Михайловский Д.В., Матющенко Д.Н.

АНАЛИЗ МЕТОДИК РАСЧЕТА ГНУТОКЛЕЕННЫХ РАМ

Методики расчета гнутоклееных рам из клееной древесины несколько ограничены. В 70-е годы XX века 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_{rs} к моментам сопротивления сечения. Эти коэффициенты учитывают влияние кривизны на величину краевого напряжения и применяются для гнутоклееных рам с соотношением

$$h/r \geq \frac{1}{7}.$$

Расчет на прочность сжатоизгибаемых элементов, с учетом поправочных коэффициентов k_{rn} и k_{rs} :

- проверка напряжений по внешней кромке:

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

- проверка напряжений по внутренней кромке:

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

Расчетный изгибающий момент $M_{\text{д}}$, учитывающий деформированную схему элемента:

$$M_{\text{д}} = \frac{M}{\xi}; \quad \xi = 1 - \frac{N}{\varphi R_c F_{\text{оп}}}, \quad (3)$$

где M – изгибающий момент в расчетном сечении без учета деформированной схемы элемента; φ – 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; ξ – коэффициент, учитывающий дополнительный момент в деформированной схеме; k_{rn} и k_{rs} – 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 ξ 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%) [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:

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

$$\sigma_r^{\max} = \frac{M}{W} K_r^{\max}, \quad (5)$$

где $K_{\theta H} = 0,57 \left(\frac{h}{r_0} \right) - 0,37 \left(\frac{h}{r_0} \right) + 1$;

$$K_{\theta B} = \begin{cases} 1 + 0,5 \frac{h}{r_0} \rightarrow npu \frac{h}{r_0} \leq 0,4 \\ 0,83 + 0,9 \frac{h}{r_0} \rightarrow npu \frac{h}{r_0} > 0,4 \end{cases}; \quad K_r^{\max} = 0,25 \frac{h}{r_0}.$$

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

В пособии к СНиП II-25-80 [9], которое вышло в 1986 году, предложены 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 гнутоклесаемых 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 $r_0 = r - z_0$; $F = bh$; $r_1 = r - \frac{h}{2}$; $z_0 = \frac{h^2}{12r}$; $\sigma_{\theta i}$ – 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 $k = (b^2 - a^2)^2 - 4 \cdot a^2 \cdot b^2 \cdot \left[\ln \left(\frac{b}{a} \right) \right]^2$, в которой σ_{θ} – нормальное напряжение, действующее в плоскости сечения; σ_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:

$$\sigma_c = \frac{N_{y2}}{F} + \frac{M_{o,y2}(r_0 - r_1)}{F \cdot y_0 \cdot r_1}; \quad (10)$$

- в растянутой зоне:

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

- максимальные радиальные напряжения:

$$\sigma_r = \frac{N \cdot \ln\left(\frac{r_0}{r_1}\right)}{F} + \frac{M_{o,yz} \left[\frac{r_0}{r_1} - 1 - \ln\left(\frac{r_0}{r_1}\right) \right]}{F \cdot y_0}, \quad (12)$$

где $y_0 = z_0 = \frac{h^2}{12r}$.

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 σ_r растягивают древесину поперек волокон, в карнизных узлах гнутоклееных рам они сжимающие. Правомерность применения формул для расчета карнизных узлов вызывает много вопросов, также они и не применимы к расчету карнизного узла гнутоклеёной рамы.

Также проведен расчет гнутоклеёных рам в ПК ЛИРА 9.6 с использованием анализа МКЕ (метод конечных элементов). В плоской постановке были проведены численные исследования пластинчатыми элементами типа 44 и 42 (универсальный четырехугольный и треугольный конечный элемент (КЕ) оболочки). В опорном узле была смоделирована передача 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 же ортогонально-анизотропные (ортотропные) характеристики, а именно:

- модуль упругости вдоль волокон – $E1=10\,000$ МПа;
- модуль упругости поперек волокон – $E2=400$ МПа;
- модуль сдвига – $G=500$ МПа;
- коэффициенты Пуассона – $\nu1=0,019$; $\nu2=0,48$;
- плотность $R_0=4,905$ кН/м³.

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

- модуль упругости – $E=206\,000$ МПа;
- коэффициенты Пуассона – $\nu=0,3$;
- плотность $R_0=78,5$ кН/м³.

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, расчетные схемы представлены на рисунке 1.

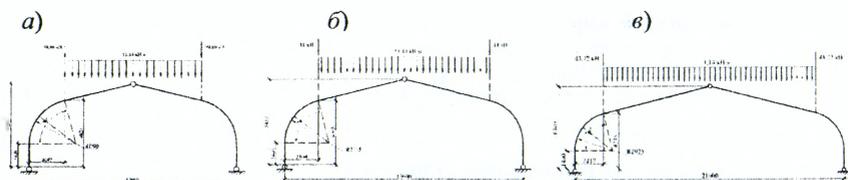


Рисунок 1 – Расчетные схемы гнутоклееных рам: а) ГРК-12-2700; б) ГРК-15-2775; в) ГРК-21-2925

Таблица 1 – Исходные данные

Марка рамы	Расчетная нагрузка, кН/м	Сечение в карнизном узле рамы, (bхh), мм	Радиус кривизны карнизного узла, мм	r_0/h	Максимальные внутренние усилия в карнизном узле	
					М, мНм	N, мН
ГРК-12-2700	11,14	160х592	2700	4,56	-0,114	-0,1
ГРК-15-2775		160х688	2775	4,03	-0,16	-0,125
ГРК-21-2925		160х896	2925	3,26	-0,27	-0,177

Значения напряжений σ_c , σ_p , σ_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 неточной 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: σ_c – до 28%, σ_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)	Кузнецова Н.М. (1984)	Пособие к СНиП II-25-80 (1986)	Серов Е.Н. (2011)	ПК Лира 9.6
ГРК-12-2700	σ_c	-11,05	-13,75	-11,40	-13,20	-14,26	-11,3
	σ_p	9,55	9,92	10,73	11,4	10,34	8,11
	σ_r	-0,56	-	-0,57	-0,73	-0,84	-0,57
ГРК-15-2775	σ_c	-11,65	-15,1	-12,01	-13,87	-15,01	-11,6
	σ_p	9,87	10,7	11,21	11,74	10,61	8,1
	σ_r	-0,67	-	-0,67	-0,86	-1,01	-0,65
ГРК-21-2925	σ_c	-11,83	-16,52	-12,26	-14,13	-15,37	-11,9
	σ_p	9,64	11,23	11,28	11,5	10,26	7,98
	σ_r	-0,82	-	-0,82	-1,1	-1,29	-0,8

Бесспорно, для обеспечения надежности рамных конструкций из клееной древесины определение 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 включать в себя не только формулы для более точного определения отдельных напряжений, но и условия, которые должны учитывать сложное напряженное состояние, в котором находится клееная древесина в зоне карнизного узла.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Руководство по проектированию клееных деревянных конструкций, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. – М.: Стройиздат, 1977. – 192 с.
2. Деревянные конструкции: СНиП II-25-80. – М.: Стройиздат – Госстрой СССР, 1982. – 66 с.
3. Светозарова, Е.И. Опыт проведения испытания клееных рам пролетом 18 м / Е.И. Светозарова, Е.Н. Серов, С.А. Душечкин, В.Д. Попов // Повышение надежности и долговечности строительных конструкций: Межвуз. темат. сб. тр. – Л.: ЛИСИ. – 1972. – С. 97–114.
4. Капи, Э.А. Деревянные конструкции в современном строительстве / Э.А. Капи, Е.Н. Серов. – Кишинев: Штеница, 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. – Л., 1976. – Т. I. – 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. Влияние анизотропии на напряженное состояние кривого бруса в случае чистого изгиба: тр. ЦНИИСК им. Кучеренко / В.Г. Курганский, Н.М. Кузнецова. – М., 1981. – С. 148–155.
8. Освенский, Б.А. Исследование напряженного состояния гнутоклееного деревянного элемента и конструкции // Вопросы прочности, долговечности и деформативности древесины и конструкционных пластмасс: сб. тр. № 186 / Б.А. Освенский, Н.М. Кузнецова 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. Некоторые особенности расчета клееных деревянных конструкций: сб. науч. тр. Междунар. Симпозиума / А.Я. Найчук, Е.Н. Серов, И.Ф. Захаркевич – Брест: ОАО «Брестская типография», 2009. – С. 205–211.
13. Конструкції будинків і споруд. Дерев'яні конструкції. Основні положення: ДБН В.2.6-161:2010 – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – С. 34–37.
14. Еврокод 5. Проектирование деревянных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий: ТКП EN 1995-1-1-2009 (02250). – С. 29–31.

Никитин В.И., Бацкель-Бжозовска Б.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАДИУСА СТЕНОВЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ КАПИЛЛЯРНОМ ПЕЕРОНОСЕ ВЛАГИ

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучении процесса переноса жидкости в пористых средах, в том числе и в капиллярно-пористых материалах, является одной из наиболее сложных проблем гидродинамики, что объясняется неопределённостью границ потока жидкости и её свойств в пористой среде и случайным характером распределения в ней пор и капилляров. В связи с такой сложностью при анализе процессов переноса жидкой влаги в капиллярно-пористых материалах используются разнообразные модельные представления их пористой структуры.