

**УДК 624.011**

**АНАЛИЗ МЕТОДИК РОЗРАХУНКУ ГНУТОКЛЕЄНИХ РАМ З КЛЕЄНОЇ ДЕРЕВИНИ**

**АНАЛИЗ МЕТОДИК РАСЧЕТА ГНУТОКЛЕЁНЫХ РАМ ИЗ КЛЕЁНОЙ ДРЕВЕСИНЫ**

**ANALYSIS OF METHODOLOGIES FOR CALCULATING GLULAM FRAMES**

**Михайловський Д.В., к.т.н., доц., Матющенко Д.М., аспірант (Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ)**

**Михайловский Д.В., к.т.н., доц., Матющенко Д.Н., аспирант (Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев)**

**Mikhaylovskyy D.V., candidate of technical sciences, docent, Matyuschenko D.M., graduate student (Kiev national university of construction and architecture, Kiev).**

**Розглянуті основні методики розрахунку гнуктоклеєних рам. Проведено аналіз та порівняння методик з класичною теорією опору матеріалів. Наведено графіки порівняння методів визначення напружень в карнизному вузлі гнуктоклеєних рам з різними радіусами кривизни на прикладі рами промислової будівлі.**

**Рассмотрены основные методики расчета гнуктоклееных рам. Проведен анализ и сравнение методик с классической теорией сопротивления материалов. Приведены графики сравнения методов определения напряжений в карнизном узле гнуктоклееных рам с различными радиусами кривизны на примере рамы промышленного здания.**

**The basic method of calculating glulam frames. The analysis and comparison of the methods of the classical theory of strength of materials. The graphs compare methods for determining the stresses in the precipitous site glulam frames with different radii of curvature on the example of an industrial building frame.**

**Ключові слова**

**Клеєна деревина, гнуктоклеєні рами, складний напружений стан, радіус кривизни, методики розрахунку, карнизний вузол, напружено-деформований стан.**

Клеёная древесина, гнутоклеенные рамы, сложное напряженное состояние, радиус кривизны, методики расчета, карнизный узел, напряженно-деформированное состояние.

Glued wood, glulam frames, stress-strain state, radius of curvature calculation methods, Cornice node, the stress-strain state.

Методики розрахунку гнутоклеєних рам з клеєної деревини дещо обмежені. У 80-ті роки у нормативних документах не містилось вказівок до розрахунку гнутоклеєних рам. Лише після виходу Посібнику по проектуванню клеєних конструкцій [1] деякі вказівки знайшли своє відображення у СНиП II-25-80 [2]. Однак, наявні в них рекомендації дають досить приблизну уяву про дійсний напружений стан карнизного вузла гнутоклеєної рами.

Перевірка міцності прямолінійних ділянок рам виконувалась за допомогою формул складного опору, а формул для визначення радіальних напружень, в криволінійних елементах в яких діє згинальний момент збільшувачий їх кривизну, тобто формул для визначення радіальних стискаючих напружень не знайшло відображення. В нормативному документі пропонують визначати напруження за звичайною формулою (1) та (2) для стиснуто-зігнутих елементів, яка базується на лінійному розподілу напружень з введенням поправочних коефіцієнтів  $k_{rn}$  та  $k_{re}$  до моментів опору перерізу. Ці коефіцієнти враховують вплив кривизни на величини крайових напружень та застосовуються для гнутоклеєних рам з співвідношенням  $h/r \geq \frac{1}{7}$ .

Розрахунок на міцність позacentрово-стиснутих та стиснуто-згинальних елементів, з врахуванням поправочних коефіцієнтів  $k_{rn}$  та  $k_{re}$ :

- перевірка напружень по зовнішній кромці:

$$\sigma_p = \frac{N}{F_{розр}} + \frac{M_D}{W_{розр} k_{rn}}; \quad \text{де } k_{rn} = \frac{1 - 0,5 h/r}{1 - 0,17 h/r}; \quad (1)$$

- перевірка напружень по внутрішній кромці:

$$\sigma_c = \frac{N}{F_{розр}} + \frac{M_D}{W_{розр} k_{re}}; \quad \text{де } k_{re} = \frac{1 + 0,5 h/r}{1 + 0,17 h/r}; \quad (2)$$

Згинальний момент, який враховує додатковий момент від повздовжньої сили:

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

де  $M$  – згинаючий момент в розрахунковому перерізі без врахування додаткового моменту від поздовжньої сили;  $F_{розр}$  – розрахункова площа перерізу;  $\varphi$  – коефіцієнт поздовжнього згину;  $N$  – поздовжня сила;  $h$  – висота перерізу;  $r$  – радіус кривизни центральної осі криволінійної ділянки;  $W_{розр}$  – розрахунковий момент опору;  $R_c$  – розрахунковий опір деревини стиску вздовж волокон;  $\xi$  – коефіцієнт, який змінюється від 1 до 0, враховує додатковий момент від поздовжньої сили в наслідку прогину елемента;  $k_m$  та  $k_{r\theta}$  – поправочні коефіцієнти.

Ця методика, визиває сумніви щодо до оцінки міцності, так як методика не враховує характер розподілу напружень по висоті перерізу. Як відомо, для клеєної деревини характерна різко виражена анізотропія пружних і міцнісних характеристик. Вперше на нерівномірність врахування допоміжного моменту за допомогою коефіцієнту  $\xi$  в розрахунках гнукотклеєних рам було звернуто увагу при проведенні дослідження в Санкт-Петербурзькому університеті будівництва і архітектури [3]. Подальшому проф. Серовим Є.М. доведена на прикладі клеєфанерних рам, що допоміжний момент від дії нормальної сили, яка враховується за допомогою коефіцієнта  $\xi$ , призводить до значного завищення розрахункових зусиль (до 20%) [4,5,6].

В роботі Кузнєцової Н.М. [7,8] запропоновані апроксимуючі формули для визначення тангенціальних (4) та максимальних радіальних (5) напружень в криволінійній ділянці:

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

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

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

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

Треба відмітити, що у вище наведених формулах розглянута лише зона бісектрисного кута карнизного вузла.

Слід відмітити, що в Посібнику до СНиП II-25-80 [9], який вийшов в 1986 році запропонована дещо інша формула для розрахунку тангенціальних (6) та максимальних радіальних (7) напружень при

співвідношенні радіусу кривизни до висоти поперечного перерізу елементу  $r/h \leq 7$  (елементи великої кривизни, до яких відносяться і карнизні вузли гнукотесених рам):

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

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

де  $r_0 = r - z_0$ ;  $F = bh$ ;  $r_1 = r - \frac{h}{2}$ ;  $z_0 = \frac{h^2}{12r}$ ;

$\sigma_{\theta, i}$  – нормальні напруження в різних шарах перерізу;

$\sigma_{r, \max}$  – максимальні радіальні напруження;  $M$  – розрахунковий згинальний момент;  $r_0$  – радіус кривизни нейтрального шару;  $r_1$  – радіус кривизни нижньої кромки кривого бруса;  $F$  – площа поперечного перерізу кривого бруса;  $z_0$  – зміщення нейтральної осі від геометричної осі криволінійної ділянки,  $z_0 = \frac{I}{Fr}$ ; ;  $I$  – момент інерції перерізу кривого бруса;  $r$  – радіус кривизни криволінійної ділянки;  $h$  – висота перерізу.

Точне рішення задачі Головіна С.Х. (методика розрахунку кривого бруса за методами опору матеріалів) для прямокутного перерізу [10] має такий вигляд:

- нормальні напруження, які діють в площині перерізу:

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

- радіальні напруження, які діють в площині перерізу:

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

$$\text{де } k = (b^2 - a^2)^2 - 4 \cdot a^2 \cdot b^2 \cdot \left[ \ln \left( \frac{b}{a} \right) \right]^2;$$

в якій  $\sigma_{\theta}$  – нормальне напруження, діюче в площині перерізу,  $\sigma_r$  – нормальне напруження, яке є наслідком натискання поздовжніх елементів один з одного;  $M$  – згинальний момент;  $k$  – сталий коефіцієнт інтегрування;  $a$  – внутрішній радіус кривого бруса;  $b$  – зовнішній радіус кривого бруса;  $r$  – радіус нейтральної осі кривого бруса.

У 2011 році виходить навчальний посібник [11] під редакцію проф. Серова Є.М. та робота д.т.н. Найчука А.Я. [12] в якій містяться дещо інші формули. В цих роботах пропонується оцінювати міцність жорстких вузлів рам з криволінійними ділянками за такими формулами:

- в стиснутій зоні:

$$\sigma_c = \frac{N_{yz}}{F_{розр}} + \frac{M_{\partial,yz}(r_0 - r_1)}{F_{розр} y_0 r_1}; \quad (10)$$

- в розтягнутій зоні:

$$\sigma_p = \frac{M_{\partial,yz}(r_2 - r_0)}{F_{розр} y_0 r_2} - \frac{N_{yz}}{F_{розр}}; \quad (11)$$

- максимальні радіальні напруження:

$$\sigma_r = \frac{N \ln\left(\frac{r_0}{r_1}\right)}{F_{розр}} + \frac{M_{\partial,yz} \left[ \frac{r_0}{r_1} - 1 - \ln\left(\frac{r_0}{r_1}\right) \right]}{F_{розр} y_0}; \quad (12)$$

де  $y_0 = z_0 = \frac{h^2}{12r}$ ;

В новому нормативному документі ДБН В.2.6-161:2010 [13], який містить положення EN1995-1-1 [14], формул для розрахунку рамних конструкцій не має. В ньому містяться тільки формули для розрахунку криволінійних балок. У відмінності від більшості балок з криволінійною ділянкою, де радіальні напруження  $\sigma_r$  розтягують деревину поперек волокон, в карнизних вузлах гнукотлеєних рам вони є стискаючими. Правомірність застосування формул (13 та 14) для розрахунку карнизних вузлів визиває багато питань, і досі достатньо не досліджувалось.

Напруження від згину в гребні криволінійної балки розраховується наступним чином:

$$\sigma_{m,d} = K_L \frac{6M_{ap,d}}{bh_{ap}^2}; \quad (13)$$

де  $K_L = K_1 + K_2 \left(\frac{h_{ap}}{r}\right) + K_3 \left(\frac{h_{ap}}{r}\right)^2 + K_4 \left(\frac{h_{ap}}{r}\right)^3$ ;

$K_1 = 1 + 1,4 \tan \alpha_{ap} + 5,4 \tan^2 \alpha_{ap}$ ;  $K_2 = 0,35 - 8 \tan \alpha_{ap}$ ;

$K_3 = 0,6 + 8,3 \tan \alpha_{ap} - 7,8 \tan^2 \alpha_{ap}$ ;  $K_4 = 6 \tan^2 \alpha_{ap}$ ;  $r = r_{in} + 0,5h_{ap}$ ;

$b$  – ширина балки;  $M_{m,d}$  – розрахунковий згинаючий момент у гребені;  $r_{in}$  – радіус внутрішньої кромки;  $h = h_{ap}$  – висота перерізу в гребені;

$\alpha_{ap}$  – кут скату в середині верхньої зони, для криволінійної балки –  
 $\alpha_{ap} = 0$ ;

Максимальні розтягуючі напруження перпендикулярні волокнам, розраховуються за наступною формулою:

$$\sigma_{t90,d} = K_p \frac{6M_{ap,d}}{bh_{ap}^2}; \quad (14)$$

$$K_p = K_5 + K_6 \left( \frac{h_{ap}}{r} \right) + K_7 \left( \frac{h_{ap}}{r} \right)^2;$$

$$K_5 = 0,2 \tan \alpha_{ap}; \quad K_6 = 0,25 - 1,5 \tan \alpha_{ap} + 2,6 \tan^2 \alpha_{ap};$$

$$K_7 = 2,1 \tan \alpha_{ap} - 4 \tan^2 \alpha_{ap}; \quad r = r_{in} = 0,5h_{ap};$$

$M_{ap,d}$  – розрахунковий згинаючий момент у гребені, в наслідку якого виникає розтягуюче напруження, паралельне внутрішній криволінійній поверхні.

Провівши аналіз вище згаданих методик розрахунку напружень на прикладі гнутоклеєної рами промислової будівлі прольотом 12 м, крок рам 6 м з різними радіусами кривизни та з ухилом ригеля 1:4, вихідні дані наведені в таблиці 1 та надані розрахункові схеми на рис. 1-3.

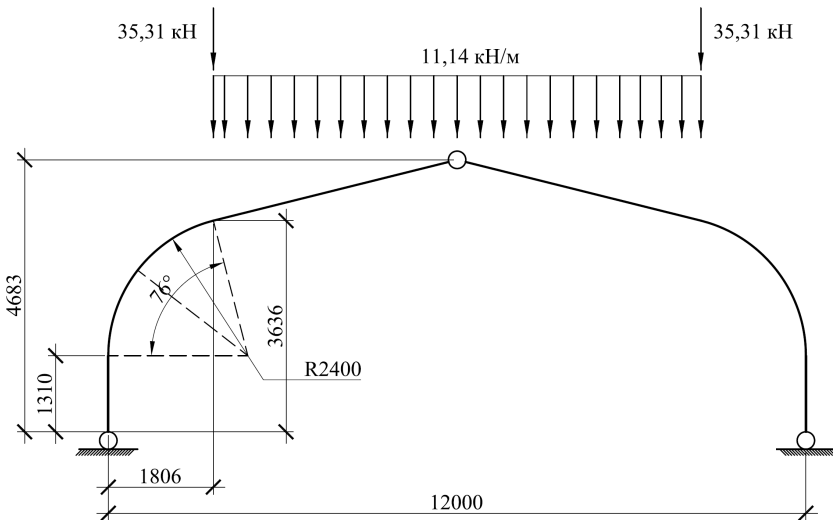


Рис. 1. Розрахункова схема гнутоклеєної рами ГПК-12-2400.

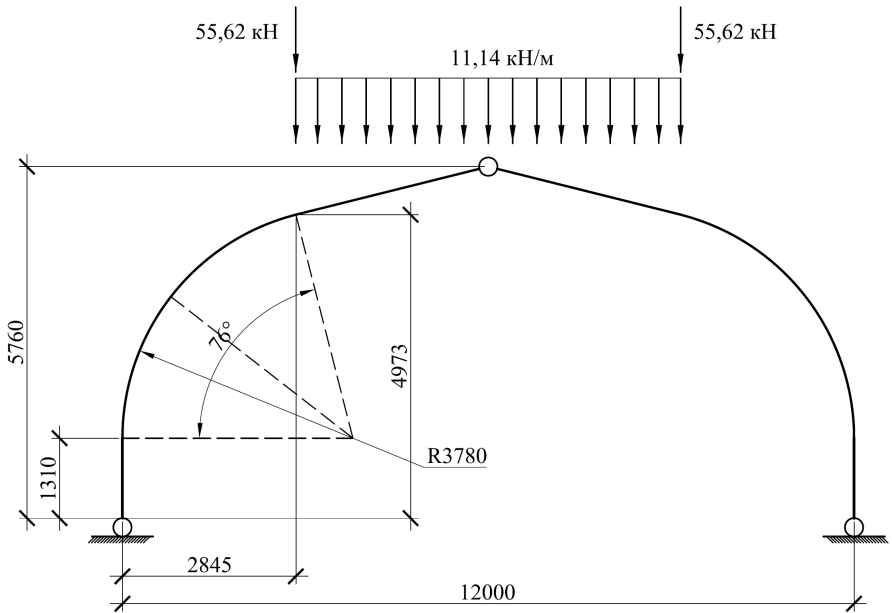


Рис. 2. Розрахункова схема гнукотесної рами ГРК-12-3780.

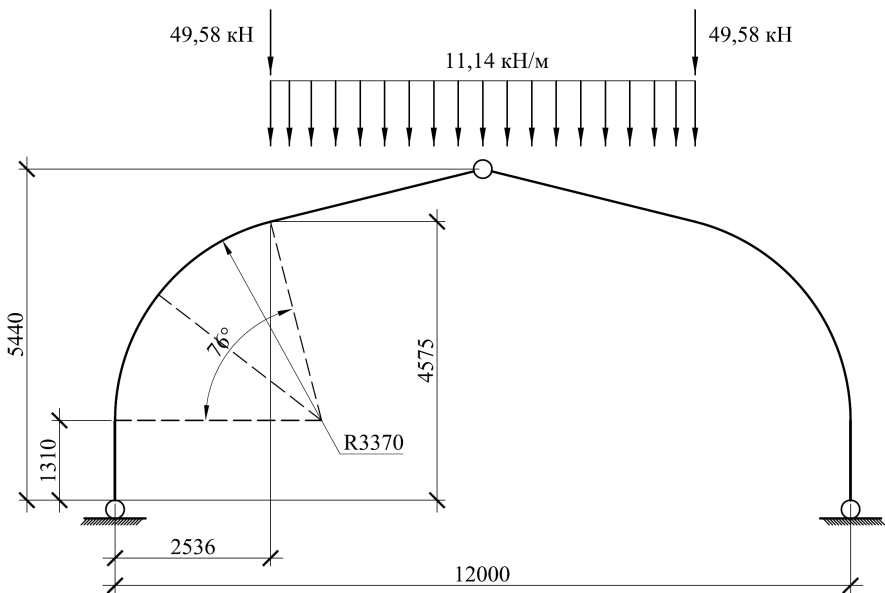


Рис. 3. Розрахункова схема гнукотесної рами ГРК-12-3370.

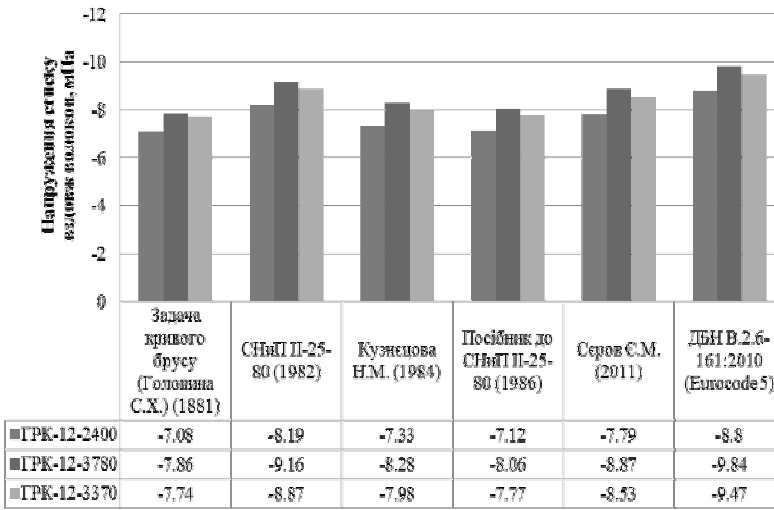
Таблиця 1

Марка рами	Розрахункове навантаження, кН/м	Переріз в карнизному вузлі рами, (bxh), мм	Радіус кривизни карнизної вузла, мм	$r_0/h$	Внутрішні зусилля в карнизному вузлі	
					M, мНм	N, мН
ГРК-12-2400	11,14	190x688	2400	3,49	-0,096	-0,088
ГРК-12-3780		190x896	3780	4,22	-0,188	-0,138
ГРК-12-3370		190x784	3370	4,3	-0,139	-0,113

Згідно вище наведеним вихідним даним, були проведені та співставлені результати розрахунку напружень за різними методиками.

Значення напружень  $\sigma_c$ ,  $\sigma_p$ ,  $\sigma_r$  одержані за класичною теорією опору матеріалів (Головіна С.Х) є найбільш точні. Проведений розрахунок показав, що найбільш хибною з методик є методика СНиП II-25-80 [2], яка дає результати, що значно перевищують значення напружень за точною методикою опору матеріалів, а саме:  $\sigma_c$  – 14,2%,  $\sigma_p$  – 6,5%, а радіальні напруження взагалі не можливо розрахувати за цим нормативним документом. Результати досліджень за іншими методиками наведені у формі графіків 1,2,3.

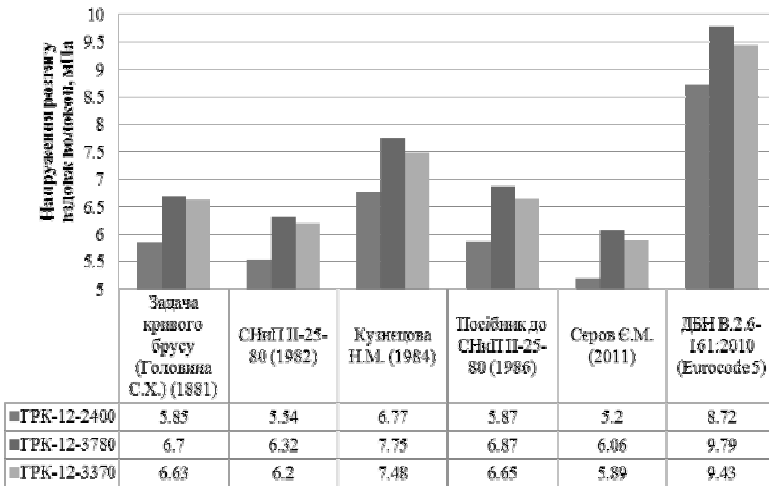
**Графік порівняння методів визначення напружень стиску вздовж волокон**



Графік 1. Порівняння методів визначення напружень стиску  $\sigma_c$  в бісектрисному куті карнизного вузла гнотоклееної рами.

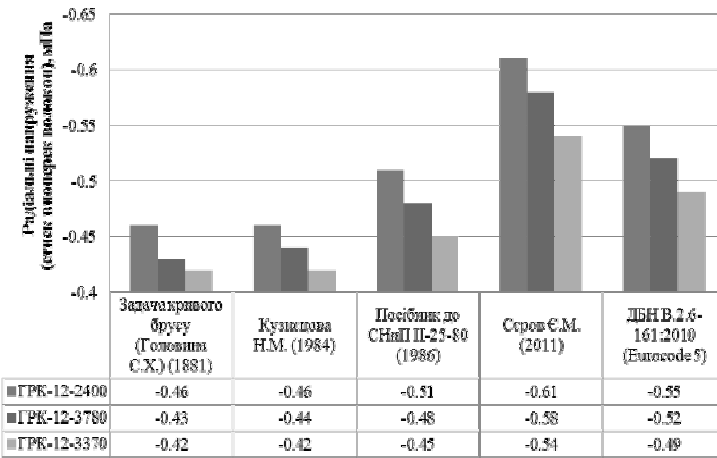


**Графік порівняння методів визначення  
напружень розтягу вздовж волокон**



Графік 2. Порівняння методів визначення напружень розтягу  $\sigma_p$  в бісектрисному куті карнизного вузла гнотоклеєної рами.

**Графік порівняння методів визначення  
радіальних напружень (стиск впоперек волокон)**



Графік 3. Порівняння методів визначення радіальних напружень  $\sigma_r$  в бісектрисному куті карнизного вузла гнотоклеєної рами.

Безперечно, для забезпечення надійності рамних конструкцій з клеєної деревини визначення точних радіальних та нормальних напружень, з

врахуванням надзвичайної анізотропії фізико-механічних властивостей деревини, є дуже важливою задачею.

Існуючі методики розрахунку різняться між собою. Існує нагальна потреба в розробці точної інженерної методики розрахунку карнизних вузлів гнукотклеєних рам. Сучасна методика повинна включити в себе не тільки формули для більш точного визначення окремих напружень, а й умови, які повинні враховувати складний напружений стан в якому знаходиться клеєна деревина.

**1.** Руководство по проектированию клееных деревянных конструкций, ЦНИИСК им. В.А.Кучеренко, Москва Стройиздат 1977г, 192 стр. **2.** Деревянные конструкции: СНиП II-25-80. [Чинний від 1982-01-01]. – 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: Мужвуз. темат. сб. тр. Л.: ЛИСИ, 1972, с.97-114. **4.** Канн Э.А., Серов Е.Н. Деревянные конструкции в современном строительстве. Кишинев: Штаница, 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.1, 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 гнукотклееного деревянного элемента и конструкции. – В кн. Вопросы прочности, долговечности и деформативности древесины и конструкционных пластмасс: Сб. тр. / МИСИ им. Куйбышева. М., 1981, №186, 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 конструкции.: Сб науч.тр. Междунар. Симпозиума, г. Брест, 15-18 июня 2009г. / Ред. кол.: А.Я. Найчук (гл.ред.) и др. – Брест: ОАО «Брестская типография», 2009. – с.205-211. **13.** ДБН В.2.6-161:2010. Конструкції будинків і споруд. Дерев'яні конструкції. Основні положення. [Чинний від 2011-09-01] – 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.