

СОСТАВНЫЕ БАЛКИ НА РАСТЯНУТЫХ СВЯЗЯХ И ОСНОВЫ ИХ РАСЧЕТА

д.т.н., проф. Серов Е.Н. (Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет)

Dr. Professor Serov E.N. (State University of Building Engineering and Architecture)

Аннотация

Нагели в соединениях деревянных конструкций воспринимая сдвиг, работают обычно на изгиб, что уменьшает их несущую способность. Реализуя принцип струны, тонкие стержни связей нужно ориентировать вдоль главных растягивающих напряжений. Это существенно увеличивает несущую способность конструкций.

Summary

The dowels sensing the shift in connection, usually working on a bend. That decreases bearing capacity. Implementing "The principle of string", the thin steel cores, in connection, need to orientate along the main stretching voltage. This is a significant increase of bearing capacity of structures.

Практически во всех нагельных соединениях деревянных конструкций (ДК), в том числе и классических составных балок В.С. Деревягина используется работа древесины на смятие в нагельном гнезде и на скалывание в промежутках между нагельями. Нагели, воспринимая сдвиг, работают и, естественно, рассчитываются на изгиб. Для таких соединений еще в 30-е гг. Г.Г. Карлсенем был сформулирован принцип дробности. Устоявшуюся практику использования работы любых нагелей на изгиб во многих случаях рациональной назвать, с элементарной инженерной точки зрения, затруднительно.

Значительно эффективнее использовать работу тонких стержней на растяжение (принцип струны), чем на привычный изгиб, если, конечно, это возможно. А возможность такая имеется в составных изгибаемых и сжато-изогнутых элементах ДК, при усилении конструкций и др., если реализовать указанный принцип.

Усиления приопорных зон КДК в направлении главных растягивающих напряжений [6], впервые опубликованные в 1978г. на основе многолетних исследований, не следует путать с решениями силовых узлов, названных «Системой ЦНИИСК», идею которой лишь через два года после /6/ - в 1980г работники ОДК доложили в

Архангельске (и опубликовали) как первые поиски требуемого угла склеивания – шаг углов был принят равным 5° - 10° .

Экспериментальные исследования головных образцов современных клееных деревянных конструкций (КДК) и диагностирование сотен эксплуатируемых КДК выявили первопричины их отказов в виде зацепистых трещин, часто вне зон действия максимальных $\tau/1—5/$. При сложном напряженно-деформированном состоянии (НДС) в приопорных зонах КДК наиболее опасными оказывались именно главные растягивающие напряжения (σ_1). Достаточно было локализовать эти местные опасные напряжения, как несущая способность КДК заметно увеличивалась /6,7/.

Если абстрагироваться от традиционных воззрений некоторых специалистов на НДС в швах сплачивания составных элементов ДК, на работу стыковых соединений и основные первопричины разрушения КДК, реализацию принципа струны можно расширить. В частности, наряду с балками Деревягина можно предложить балки на растянутых связях. При этом шов сплачивания, например, двух брусков легко представить в виде некоего «нейтрального» слоя, где главные напряжения σ_1 равны по величине касательным и действуют под углом 45° к направлению волокон. Тогда, реализуя принцип струны, при восприятии суммарного сдвига между изгибаемыми брусками клеенные или ввинченные стержни будут работать на растяжение. Предварительные сопоставительные эксперименты, проведенные нами на конструкциях двухметрового пролета, выявили достаточно высокую эффективность этих новых балок. Их жесткость при одинаковых поперечных сечениях оказалась больше, чем конструкций с нагельными связями, работающими на изгиб.

В Стандарте предприятия [8], написанном в основном моим последователем и единомышленником А. Я. Найчуком, приведены формулы определения нормативной несущей способности винтов на выдергивание. Найчук успешно занимается и обсуждаемой темой [10,11]. В настоящее время он решает численные контактные задачи в объемном НДС с оптимизацией геометрических параметров винтов нового поколения и успешно работает над нормативной литературой применительно к [9].

Итак, для соединений на винтах, удовлетворяющих требованиям СтАДД – 3.0 – 2011 [8] и EN 14592, при условии, что $6 \text{ мм} \leq d \leq 12 \text{ мм}$ и $0,6 \leq d_1/d \leq 0,75$, характеристическое (нормативное) значение несущей способности на выдергивание определяется по формуле (1) :

$$F_{ax,k,Rk} = \frac{n_{ef} \cdot f_{ax,k} \cdot d \cdot l_{ef} \cdot k_d}{1.2 \cdot \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha} \quad (1)$$

$$\text{Здесь } f_{ax,k} = 0,52 d^{-0,5} l_{ef}^{-0,1} \rho_k^{0,8}; \quad (2)$$

$$k_d = \min \left\{ \frac{d}{8}; 1 \right\} \quad (3)$$

$F_{ax,\alpha,Rk}$ - характеристическое (нормативное) значение несущей способности при выдергивании под углом α к волокнам древесины (Н);

$f_{ax,k}$ - характеристическое (нормативное) значение прочности при выдергивании винта, ввинченного перпендикулярно волокнам древесины (Н/мм²);

n_{ef} - эффективное количество винтов в соединении, определяемое по формуле (8.7) /8/;

l_{ef} - длина резьбовой части (анкеровки) в соединяемом элементе (мм);

ρ_k - характеристическое (нормативное) значение плотности древесины (кг/м³);

α - угол между осью винта и направлением волокон древесины $\alpha \geq 30^\circ$.

d - наружный диаметр резьбы;

d_l - внутренний диаметр резьбы.

Если требования относительно внешнего и внутреннего диаметров резьбы винта не выполняются, то характеристическое (нормативное) значение несущей способности выдергиванию $F_{ax,\alpha,Rk}$ определяется по формуле

$$F_{ax,\alpha,Rk} = \frac{n_{ef} \cdot f_{ax,k} \cdot d \cdot l_{ef}}{1.2 \cdot \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha} \left(\frac{\rho_k}{\rho_a} \right)^{0,8}, \quad (4)$$

где: $f_{ax,k}$ - характеристическое (нормативное) значение прочности при выдергивании винта, ввинченного перпендикулярно волокнам древесины, определяемое в соответствии с /8/ или EN 14592

для соответствующей плотности ρ_a древесины (кг/м³).

Для инженерных расчетов такой подход сложен и мало

понятен проектировщику.

В отечественных нормах [9] приведена простая логичная формула определения несущей способности соединений на растянутых связях

$$T_{расч.} = R_B \cdot \pi \cdot d l_1, \quad (5)$$

где R_B — расчетное сопротивление выдергиванию винта на единицу поверхности соприкосновения нарезной части и равно $10 \text{ кгс/см}^2 = 1 \text{ МПа}$ (Для вклеенных стержней эта величина в [9] дается равной 4 МПа !);

l_1 — длина нарезки, внедренная в древесину (см);

d — наружный диаметр нарезной части винта (см).

Величина R_B занижена даже для традиционных глухих винтов. У винтов нового поколения высота нарезки (вылет крыльев шнека) заметно больше, а механическая связь между деревом и металлом более надежная при колебаниях температурно-влажностных условий.

Производство новых балок аналогично технологии изготовления известных составных элементов на пластинчатых нагелях - типа балок В.С. Деревягина (рис. 1).

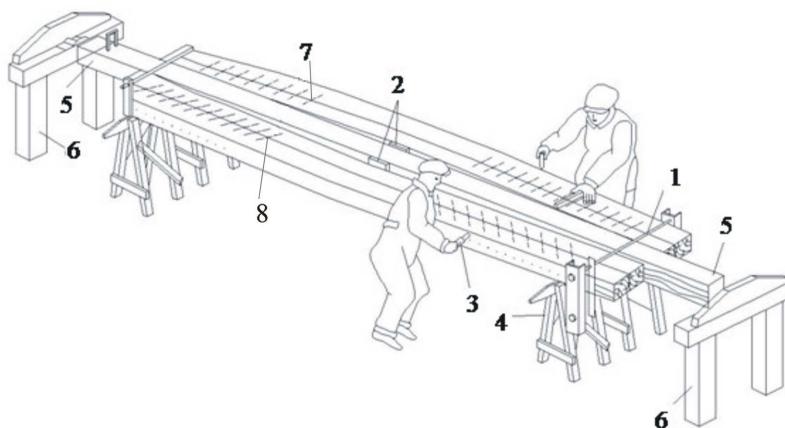


Рис. 1. Изготовление составных балок на изгибаемых и растягиваемых ввинченных стержнях:

1 – хомуты; 2 – клинья; 3 – сверло; 4 – козлы; 5 – брус, уложенный на опоры 6; 7 – разметка пионерных отверстий для изгибаемых стержней; 8 – разметка отверстий для растягиваемых стержней.

Пробные экспериментальные исследования всех балок осуществлялись по известной рациональной схеме (рис. 2).

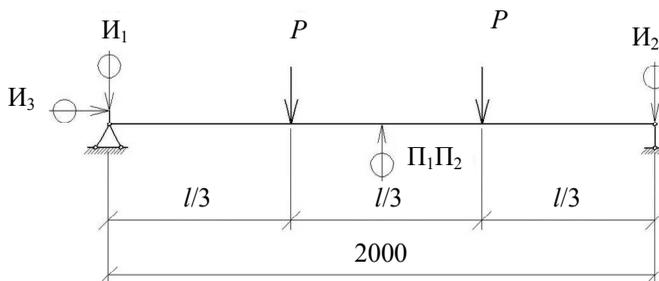


Рис. 2. Расчетная схема и схема испытания балок

Балки цельного поперечного сечения из единого бруса 100*200 мм (Б1), а также отдельные – из двух брусков 100*100 мм (без связей – Б2) здесь не рассматриваются.

Расчетные обоснования балок на податливых связях

Балки на винтах, работающих в сопряжении на изгиб (Б4), обладают незначительной несущей способностью. Геометрические характеристики конструкции те же, что и у эквивалентной балки В.С. Деревягина (Б3). Несущая способность винта при его изгибе определяется как для гвоздей, $d_1 = 0,6$ см.

$$T_{\min} = 400d_1^2 = 400 \cdot 0,6^2 = 1440 \text{ Н}$$

Необходимое количество перпендикулярных винтов с параметрами $l = 18$ см; $d = 1$ см; $d_1 = 0,6$ см; $a = 0,8$ см; $t = 0,2$ см; $n_{\text{треб}} = 45526/1440 = 31,6 \approx 32$ винта рис.3. Здесь $T_{\text{треб}} = 45526$ Н – суммарная величина сдвига в составной балке при достижении краевых напряжений, равных расчетному сопротивлению древесины 2 сорта (13 МПа).

По правилам расстановки винченных стержней, работающих на изгиб ($S_1 = 7d$; $S_2 = 3,5d$; $S_3 = 3d$) можно установить в один ряд 11 винтов на длине $0,4l = 0,4 \cdot 200 = 80$ см.

Краевое напряжение в 1300 Н/см² недостижимо, так как требуемое количество винтов не установить. Принцип сбалансированной прочности не реализуется.

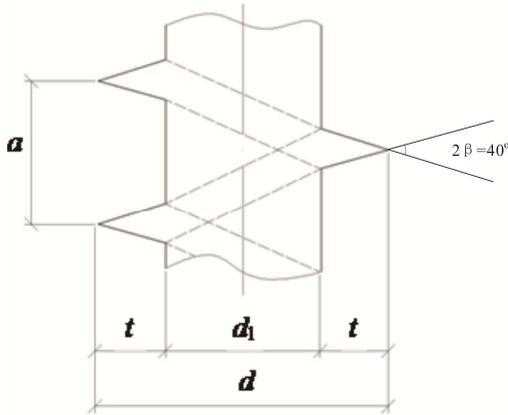


Рис.3. Геометрические параметры нарезки винта.

Фактически максимальный сдвиг, воспринимаемый связями, здесь почти в 3 раза меньше требуемого.

$$T_{\text{факт}} = 11 \cdot 1440 = 15840 \text{ Н}$$

Исходя из этого максимальная P при работе винтов на изгиб в составной балке по схеме на рис. 2 равна

$$P_{\text{факт}\perp} = \frac{T_{\text{факт}} \cdot I_{\text{обр}}}{67 \cdot S_{\text{бр}}} = \frac{15840 \cdot 6666,7}{67 \cdot 500} = 3150 \text{ Н,}$$

что намного меньше требуемого при суммарном сдвиге даже между двумя отдельными брусками 100 x 100 мм, краевые напряжения в которых достигают 13 МПа. При таком решении и усилении деревянных конструкций краевые напряжения могут достигнуть лишь 34,8% от R_u .

$$\sigma_{\text{кр}} = \frac{T_{\text{факт}} \cdot R_n}{T_{\text{расч}}} = \frac{15840 \cdot 1300}{45526} = 452 \text{ Н} = 4,52 \text{ МПа}$$

Эффекта усиления практически нет.

Условие реализуется при постановке винтов вдоль траекторий главных растягивающих напряжений в рассматриваемых эквивалентных балках Б5.

Несущая способность традиционного, стандартного, винта (шурупа) по [9] равна:

$$T_{\text{вин}} = R_{\text{вин}} \cdot \pi \cdot d \cdot l = 100 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 11 = 34540 \text{ Н}$$

Современные длинномерные винты нового поколения имеют существенно расширенную номенклатуру и по основным размерам: l , d , d_1 и др. и по шагу резьбы «а», и, что особенно важно, по ее глубине или «вылету консоли шнека» резьбы $t = 0,5(d - d_1)$ (см. рис.3)

У стандартных шурупов, для которых приведено в [9] расчетное усилие на выдергивание $R_{\text{вш}}=10\text{кг/см}^2$ на единицу поверхности соприкосновения нарезной части с древесиной, величина t обычно не превышает 1,0 мм. У современных винтов этот размер достигает 1,5 - 2,0 мм, а нарезка может распространяться на всю длину стержня. Как показывают исследования [8, 10, 11] при достаточной длине (около $15d$) внедрения винта $l_{\text{расч}}$ в древесину, происходит не выдергивание его, а разрыв по d_1 , даже при изготовлении винтов из легированных сталей. Это требует оценить не только прочность древесины при разных видах НДС в гнезде, а и самого винта на растяжение.

В новых составных балках, состоящих обычно из двух одинаковых брусев, или при усилении деревянных конструкций в первом приближении рассматриваются четыре условия возможного выхода материалов в запредельное состояние и выбирается для расчета минимальная величина (T_{min}). Эти условия возможны:

1. При разрушении от растяжения винта по d_1 ;
2. При смятии древесины по площадкам «шнека» под углом к волокнам;
3. При срезе древесины по периметру «захвата» древесины шнеком также под углом к волокнам.

Здесь коэффициентом $K_{\text{ск}} = 0,8$ учитывается ослабление работы древесины на перерезание волокон за счет поперечного скалывания ее в окрестностях двух точек, диаметрально расположенных касательно продольному направлению волокон (рис 4).

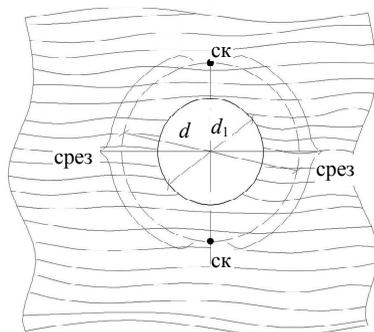


Рис. 4. Особенности НДС при перерезании древесины в винтовом гнезде.

4. Возможно еще одно, четвертое, условие разрушения древесины, а именно при изгибе «консоли» высотой поперечного сечения, равной шагу нарезки винта «а». Она (высота h_k) меняется с учетом угла наклона от h_{max} до h_{min} . Направление волокон меняется от 0° до 90° .

Однако здесь весьма затруднительно четко выявить не столько саму расчетную схему, сколько постоянно плавно меняющиеся характеристики древесины. При этом будет меняться и длина деревянной консоли: при работе древесины на изгиб поперек волокон – l_{min} , а при изгибе вдоль волокон – l_{max} .

Расчетная длина консоли имеет переменную величину. При воздействии нагрузки по касательной по направлению волокон (см. рис.4) длина консоли будет минимальной и равной высоте нарезки $l_k = t = 0,2$ см. Самое слабое звено здесь: резкое падение R_u при изгибе консоли поперек волокон. Особенно на растянутой кромке – всего $R_{p,90} \approx 0,3$ Мпа. Скорее всего здесь произойдет, как и при рассмотрении среза, скалывание поперек волокон. С плавным переходом к воздействию «шнека» на концы перерезаемых сверлением волокон длина консоли увеличивается. Как показывают предварительные испытания, излом консоли происходит иногда на заметном удалении от кромки пионерного отверстия. На основании принципа Сен-Венана можно принять $l_k = 2,0a$.

При завинчивании «шнека» перпендикулярно к направлению волокон древесины в данном случае $l_{k,max} = 2 \cdot a = 2 \cdot 0,8 = 1,6$ см.

При завинчивании под углом, в частности $\alpha = 45^\circ$, l_k будет меньше вообще, а «слева» и «справа» тоже отличаться (рис. 5).

При рассмотрении «левой» консоли N_c и P_u равны

$$N_c = P_{cm} \cdot \cos 25^\circ = 0,906 P_{cm}$$

$$P_u = P_{cm} \cdot \sin 25^\circ = 0,423 P_{cm} \quad \text{– слева}$$

$$P_u = 0,906 P_{cm} \quad \text{– справа, где } P_{cm} \text{ – равнодействующая сила смятия.}$$

Если принять угол смятия древесины на одном витке нарезки

$$\gamma_{смер} = (\gamma_{сmmax} + \gamma_{сmmin}) 0,5 = 45^\circ,$$

$$l_k = 2,0 \cdot a \cdot \cos 45^\circ = 2,0 \cdot 8 \cdot 0,707 = 11,3 \text{ мм} = 1,13 \text{ см}$$

Выполненные расчеты показали, что консоль слева (см. рис. 5) как сжато изогнутый стержень находится в менее опасном состоянии. «Правая» консоль испытывает изгиб с растяжением. Здесь и плечи больше, и изгибающие моменты суммируются.

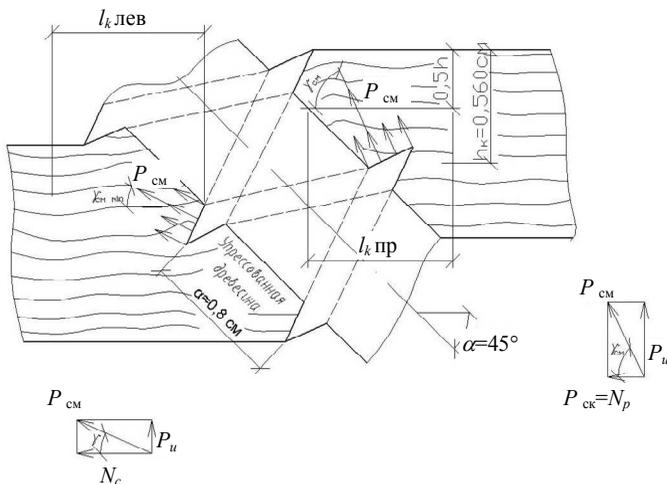


Рис. 5. Схема нагружения деревянных консолей «слева» и «справа» у винта.

Конечно, НДС деревянных консолей требуют специальных экспериментальных исследований, однако приближенные вычисления привели к следующим результатам:

1. Несущая способность винта при растяжении составила

$$T_{расч.}^{ст.} = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} R_{ст.р.} = \frac{3,14 \cdot 0,6^2}{4} \cdot 37500 = 10594 \text{ Н}$$

Здесь $R_{ст.р.} = 37500 \text{ Н/см}^2$ – расчетное сопротивление легированной стали на растяжение.

2. Несущая способность винта, внедренного в древесину на $l_{расч.} = 11 \text{ см}$ на перерезание волокон под углом.

$$T_{ср} = \pi \cdot d \cdot l_{расч.} \cdot R_{ср} = 3,14 \cdot 1 \cdot 11 \cdot 331 \cdot 0,8 = 9152 \text{ Н}$$

$$\text{Здесь } R_{ср\alpha} = R_{ср45} = \frac{80}{1 + \left(\frac{80}{16} - 1\right) \times \sin^3 45^\circ} = 331 \text{ Н/см}^2 = 3,31 \text{ МПа}$$

$$R_{ср} \approx 5R_{ср0} = 5 \cdot 160 = 800 \text{ Н/см}^2$$

0,8 – коэффициент, учитывающий частичную работу древесины в нагельном гнезде на скалывание поперек волокон (см. выше, рис. 4).

3. Несущая способность винта при смятии древесины под углом к волокнам:

$$T_{см} = \pi \cdot 0,5(d + d_1)(d - d_1) \frac{l_{расч}}{a} R_{см\alpha}^{cp} =$$

$$3,14 \cdot 0,5(0,6 + 1)(1 - 0,6) \frac{11}{0,8} \cdot 1120 = 15520 \text{ Н}$$

Древесина уплотнена шнеком. Тогда по /12/ сопротивление поперек волокон равно:

$$R_{см90} = 2,75 \cdot 40 = 90 \text{ кг/см}^2 = 900 \text{ Н/см}^2$$

Откуда

$$R_{см\alpha}^{cp} = \frac{R_{см0}}{1 + \left(R \frac{R_{см0}}{R_{см90}} - 1 \right) \sin^3 \alpha_{cp}} = \frac{1300}{1 + \left(\frac{1300}{900} - 1 \right) \sin^3 45} = 1120$$

Н/см²

Несущая способность винта даже больше, чем на срез древесины и растяжение стального винта (в нашем предположении за счет уплотнения древесины). (15520 > 10594 > 9152).

4. Несущая способность винта при изгибе деревянных консолей между витками нарезки.

Усредненная $T_{и}$ равна

$$T_{и}^{cp} = \frac{4030 + 17960}{2} * 0,8 = 8796 \text{ Н}$$

Здесь 0,8 учитывает «слабое звено» по рис. 4.

Это самая минимальная величина T , что часто подтверждается экспериментально.

При фактической несущей способности расстановки винтов, работающих на растяжение ($S_1 = 10 d$; $S_2 = S_3 = 5d$) в предлагаемой балке на длине $0,4l = 0,4 \cdot 200 = 80\text{см}$ можно установить 9 винтов в один ряд.

Несущая способность соединения $T_{факт} = n \cdot T_{мин} = 9 \cdot 8796 = 79164 \text{ Н}$, что > $T_{треб} = 45526\text{Н}$

В новых балках на растянутых связях полностью соблюдается принцип сбалансированной прочности системы: деревянных брусков по максимальным краевым напряжениям $\sigma_{кр} = 13\text{МПа}$ и средств их соединения – винтов, работающих на растяжение. (И усиление здесь существенно).

При сопоставлении результатов испытаний балок могут быть

уточнены имеющиеся коэффициенты, учитывающие податливость соединений, и получены новые для балок на винтах, работающих на растяжение. По нашим предположениям, они будут выше имеющихся в [9]. Возможно, испытания «подскажут» и другие рекомендации по усилению изгибаемых элементов деревянных конструкций.

Для инженерных расчетов новых балок по отечественным нормам [9], в них целесообразно внести расчетное сопротивление единицы площади на выдергивание (и продавливание) винтов нового поколения. При двух сплавляемых брусках — на нейтральном слое $\sigma_t = \tau$, а $\alpha=45^\circ$.

Из формулы (5) по минимуму несущей способности связи получим:

$$R_0 = \frac{T_{расч. min}}{\pi \cdot d \cdot l} = \frac{8796}{3.14 \cdot 1 \cdot 11} = 255 \text{ Н/см}^2 = 2,55 \text{ МПа} > 1,0 \text{ МПа.}$$

(В выкладках все характеристики принимались расчетными, поэтому можно считать, что мы получили также расчетную характеристику) В нормах [9] R_b можно принять $R_b = 2,5$ МПа. Такое увеличение R_b вполне оправдано и подтверждается экспериментом. Основатель нашей кафедры, всем известный корифей ДК—В.Ф.Иванов, даже для винтов старого поколения ($t \approx 1$ мм) для зоны с нарезкой еще в 1956г получил $R_b = 20 \text{ кг/см}^2 = 2$ МПа. Здесь следует напомнить, что в [9] для клеенных стержней $R_b = 4$ МПа, а для ввинченных нового поколения остается 1 МПа.

Из инженерных расчетов и нормативной литературы полезно иногда убирать «коэффициенты и величины незнания».

Список литературы

1. Серов, Е.Н. О результатах обследования некоторых видов КДК /Е.Н.Серов // Конструкции из клееной древесины и пластмасс: межвуз. темат. сб. тр. ЛИСИ. —Л., 1982.—С. 5—9.
2. Серов, Е.Н. Учет трансверсальной изотропии клееной древесины при расчете изгибаемых элементов / Е.Н.Серов // Облегченные конструкции из древесины, фанеры и пластмасс: межвуз. темат. сб. тр. ЛИСИ. —Л., 1984.—С.19—30.
3. Серов, Е.Н. Анализ напряженного состояния клееных балок в зоне наблюдаемого разрушения / Е.Н.Серов // Изв. вузов. Лесной журнал. — Архангельск. — 1986. — №6. — С.55—61.
4. Серов, Е.Н. Выбор критерия прочности для клееной древесины изгибаемых и сжатоизгибаемых элементов / Е.Н.Серов, А.В.Хапин // Изв. вузов. Лесной журнал. — Архангельск. — 1984.

— №1. — С.72—76.

5. *Серов, Е.Н.* Проблемы воззрения и пути совершенствования норм проектирования клееных деревянных конструкции / Е.Н.Серов // Изв. вузов. Лесной журнал. — Архангельск. — 2000. — №5—6. — С.139—144.
6. *Попов, В.Д.* Упрочнение приопорных зон клеодошчатых балок / В.Д.Попов, Е.Н.Серов // Конструкции из дерева и пластмасс: межвуз. темат. сб. тр. —Л., 1978. —С. 15—21.
7. *Серов, Е.Н.* Рациональное использование анизотропии прочности материалов в клееных деревянных конструкциях массового изготовления: дис. ... д-ра техн. Наук / Е.Н.Серов. —Л., 1988. —52с.
8. СтАДД 3.0-2011. Стандарт организации «Деревянные конструкции. Проектирование соединений деревянных элементов с использованием винтов и шурупов». СПб: ADD —24с.
9. СП64.13330. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80. М., 2011,137С.
10. *Найчук, А.Я.* Несущая способность соединений элементов древесных конструкций на ввинченных в древесину стальных стержнях. Сб. научн. Трудов ОГАСА «Современные строительные конструкции из металла и древесины» / А.Я.Найчук. — Одесса, 2010, —С.163-168.
11. *Найчук, А.Я.* К вопросу оценки несущей способности стальных винтовых стержней, завинченных под углом к волокнам древесины. /«Промышленное и гражданское строительство» А.Я.Найчук. — М., 2010,№1, —С.21-23.
12. *Ашкенази, Е. К.* Анизотропия конструкционных материалов: Справочник / Е.К.Ашкенази, Э.В.Ганов. —Л.: Машиностроение, 1980.—247с.