

ДИАГРАММНЫЙ ПОДХОД ПРИ РАСЧЕТЕ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО СП 5.05.01-2021

Д. Н. Лазовский¹, А. И. Гиль², Д. О. Глухов³

¹ Д. т. н., профессор, профессор кафедры строительных конструкций УО «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой», Новополоцк, Беларусь, e-mail: d.lazovski@psu.by

³ К. т. н., доцент кафедры строительных конструкций УО «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой», Новополоцк, Беларусь, e-mail: a.hil@psu.by

³ К. т. н., доцент, ведущий инженер-программист ООО «Софтклуб», Минск, Беларусь, e-mail: dzmitry.hlukhau@outlook.com

Реферат

Приводится методика расчета прочности и деформаций деревянных конструкций, включая составные из различных древесных материалов с жесткой связью между ними, с учетом нелинейности их работы под нагрузкой (расчет второго порядка с перераспределением усилий между материалами в поперечном сечении по СП 5.05.01 [1]) с использованием их диаграмм деформирования при сжатии и растяжении вдоль волокон. На основе диаграммного подхода предложена методика расчета прочности контактного шва между различными древесными материалами. Применимость предлагаемых методик к расчету деревянных конструкций продемонстрирована на примерах.

Ключевые слова: деревянные конструкции, диаграммы деформирования, прочность, деформации, контактный шов.

DIAGRAM APPROACH IN CALCULATING WOODEN DESIGN FOR SP 5.05.01-2021

D. N. Lazouski, A. I. Hil, D. O. Gluhov

Abstract

A method is presented for calculating the strength and deformation of wooden structures, including those made of various wood materials with a rigid connection between them, taking into account the nonlinearity of their work under load (second-order calculation with redistribution of forces between materials in the cross section according to SP 5.05.01 [1]) using their diagrams deformation under compression and tension. Based on the diagrammatic approach, a method for calculating the strength of a contact seam between various wood materials is proposed. The applicability of the proposed methods to the calculation of wooden structures is demonstrated using examples.

Keywords: wooden structures, strain diagrams, strength, deformations, contact seam.

Введение

Нормативные документы, регламентирующие правила проектирования строительных конструкций, – это своего рода двери из науки в практику. С бурным развитием информационных технологий и компьютерной техники задачи, которые объективно были нерешаемы или нецелесообразны на предыдущем этапе развития строительной науки, становятся осуществимыми.

Одним из путей развития теории строительных конструкций, который теоретически развивался длительное время (более полувека) и теперь стал реальным, является деформационный подход к их расчету. Наибольший эффект от его применения, с точки зрения простоты, точности, физической обоснованности, снижения зависимости от большого количества эмпирических коэффициентов, достигается для комбинированных строительных конструкций, состоящих из материалов с различными физико-механическими характеристиками, с анизотропными свойствами, нелинейностью, сложным напряжено-деформированным состоянием (косой изгиб, косое внецентренное сжатие и растяжение).

Для большинства видов конструкций деформационный подход прочно вошел в строительную науку и практику, а также в нормативные документы многих стран, в том числе Республики Беларусь, по проектированию железобетонных [1–8] и сталежелезобетонных [9–23], каменных и армокаменных [24–25], стальных [26–27] конструкций, конструкций с использованием современных композитных материалов.

Деформационный подход основан на методе сечений строительных конструкций, в котором их расчетные поперечные сечения производной формы условно разбиваются на элементарные площадки, работающие при различных силовых воздействиях на конструкции как при центральном «сжатии-растяжении» в соответствии с диаграммами деформирования их материалов в координатах «деформация-напряжения». Распределение относительных деформаций по поперечному сечению конструкций подчиняется гипотезе плоских сечений в различных постановках: например, стальные конструкции – для любо-

го поперечного сечения; железобетонные – для осредненного поперечного сечения на длине участка, включающего сечения с трещинами нормального отрыва и между трещинами. Аппроксимируя диаграммы деформирования материалов, принимая линейное распределение относительных деформаций по поперечному сечению конструкции, на любой стадии работы под нагрузкой определяют распределение нормальных напряжений в элементарных площадках, которые находятся в статическом равновесии с продольными силами и изгибающими моментами от внешних воздействий. В результате диаграммного расчета получают параметры напряженно-деформированного состояния (относительные деформации, нормальные напряжения) в любом месте поперечного сечения (и как производную – кривизну изгиба конструкции в расчетном поперечном сечении) на любой стадии деформирования конструкции.

Древесина – природный строительный материал с многими положительными качествами (высокая прочность при малом объемном весе, стойкость к агрессивной химической среде, легкая обрабатываемость, низкая теплопроводность, экологичность). Разработка прочных синтетических клеев, аналогично сварке в металлических конструкциях, расширили применение деревянных конструкций в качестве несущих, увеличив пролеты стропильных систем одноэтажных зданий, размеры сетки колонн каркасных многоэтажных зданий, появились новые конструктивные схемы панельных многоэтажных зданий из многослойной клееной древесины. С конструктивной точки зрения, древесина – анизотропный материал, который при сжатии проявляет нелинейные свойства, при длительном силовом воздействии высокого уровня – снижение прочностных показателей и развитие во времени деформаций ползучести.

Цель настоящей работы – попытаться показать преимущества диаграммного подхода к расчету деревянных конструкций в рамках СП 5.05.01-2021 «Деревянные конструкции» [1], используя примеры расчета, приведенные в СП 5.05.02-2023 «Деревянные конструкции. Правила расчета» [28].

Диаграммы деформирования древесины

В научной литературе встречаются предложения различных аппроксимации диаграммы деформирования древесины при сжатии вдоль волокон [29–33]. С целью унификации предлагается аппроксимация диаграммы деформирования древесины при кратковременном одноосном сжатии вдоль волокон в виде параболы, моделирующей аналогичную работу других конструктивных строительных материалов [2, 34, 35], где зависимость между напряжениями σ_{c0} и относительными деформациями ε_{c0} при кратковременном сжатии имеет вид (рисунок 1а):

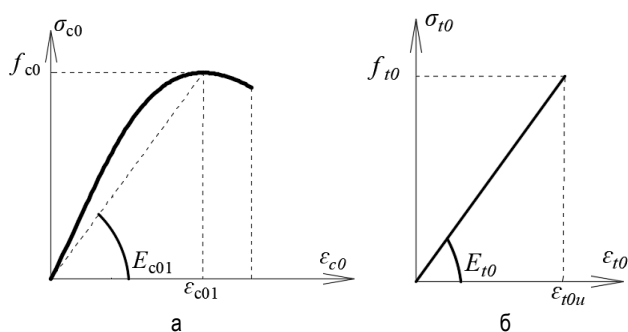
$$\frac{\sigma_{c0}}{f_{c0}} = \left(\frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k-2)\eta} \right) \text{ для } |\varepsilon_{c0}| < |\varepsilon_{c0u}|, \quad (1)$$

где $\eta = \varepsilon_{c0}/\varepsilon_{c01}$; k – коэффициент пластичности, $k = E_{c0}/E_{c01}$; ε_{c01} – относительные деформации древесины в точке максимального сжимающего напряжения; $E_{c01} = \sigma_{c01}/\varepsilon_{c01}$ – модуль деформаций, МПа.

Для аппроксимации диаграммы деформирования древесины при растяжении вдоль волокон используется линейная функция, проходящая через точку предельной прочности древесины при растяжении f_{t0u} и соответствующих ей предельных относительных деформации ε_{t0u} (рисунок 1б):

$$\sigma_{t0} = \varepsilon_{t0} \cdot E_{t0}, \quad (2)$$

где ε_{t0} – относительные деформации древесины при растяжении вдоль волокон; E_{t0} – модуль упругости древесины при растяжении вдоль волокон, Н/мм².



а – сжатии; б – растяжении
Рисунок 1 – Расчетные диаграммы деформирования древесины при кратковременном одноосном

Диаграммный подход к расчету деревянных конструкций

В общем случае силового воздействия для деревянных элементов система уравнений равновесия и совместности деформаций имеет вид:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \sigma_{w,i} A_{w,i} (x_0 - x_{w,i}) - M_x = 0; \\ \sum_{i=1}^n \sigma_{w,i} A_{w,i} (y_0 - y_{w,i}) - M_y = 0; \\ \sum_{i=1}^n \sigma_{w,i} A_{w,i} - N = 0; \\ \varepsilon_{w,i} = \frac{1}{r_x} (x_0 - x_{w,i}) + \frac{1}{r_y} (y_0 - y_{w,i}) + \frac{N}{\sum_{i=1}^n E_{w,i} A_{w,i}}; \\ \sigma_{w,i} = f(\varepsilon_{w,i}), \end{cases} \quad (3)$$

где $\sigma_{w,i}$, $\varepsilon_{w,i}$ – соответственно нормальные напряжения и относительные деформации в i -й элементарной площадке деревянного элемента; $A_{w,i}$, $y_{w,i}$ ($x_{w,i}$) – соответственно площадь поперечного сечения и расстояние от выбранных осей до центра тяжести i -й элементарной площадки; $1/r_x$ ($1/r_y$) – кривизна изгибаемого элемента в рассматриваемом поперечном сечении; y_0 (x_0) – расстояние от выбранной оси до центра тяжести рассматриваемого поперечного сечения.

Критерием образования трещин нормального отрыва является достижение древесиной элементарной площадки расчетного поперечного сечения предельных относительных деформаций при растяжении вдоль волокон. В этом случае данная элементарная площадка исключается из расчета.

Критерием разрушения деревянного элемента будет являться достижение предельных значений внутренних усилий (N , M_x , M_y) от внешних воздействий, при которых выполняются условия равновесия в системе (3). Данный критерий в полной мере позволяет учитывать нелинейную работу древесины при сжатии вдоль волокон.

Изгибающий момент при косом изгибе или косом внецентренном сжатии будет равен векторной сумме осевых составляющих:

$$M = \sqrt{M_x^2 + M_y^2}. \quad (4)$$

В общем случае нагружения прогиб u_0 деревянного элемента расчетным расстоянием между опорами l_d по максимальным значениям кривизны в плоскости осей x и y (α_k – коэффициент, зависящий от схемы распределения нагрузки) будет вычисляться по формуле:

$$u_{0x(y)} = \alpha_k \cdot \left(\frac{1}{r} \right)_{x(y)} \cdot l_d^2. \quad (5)$$

Расчетное значение прогиба при косом изгибе будет равно:

$$u_0 = \sqrt{u_x^2 + u_y^2}. \quad (6)$$

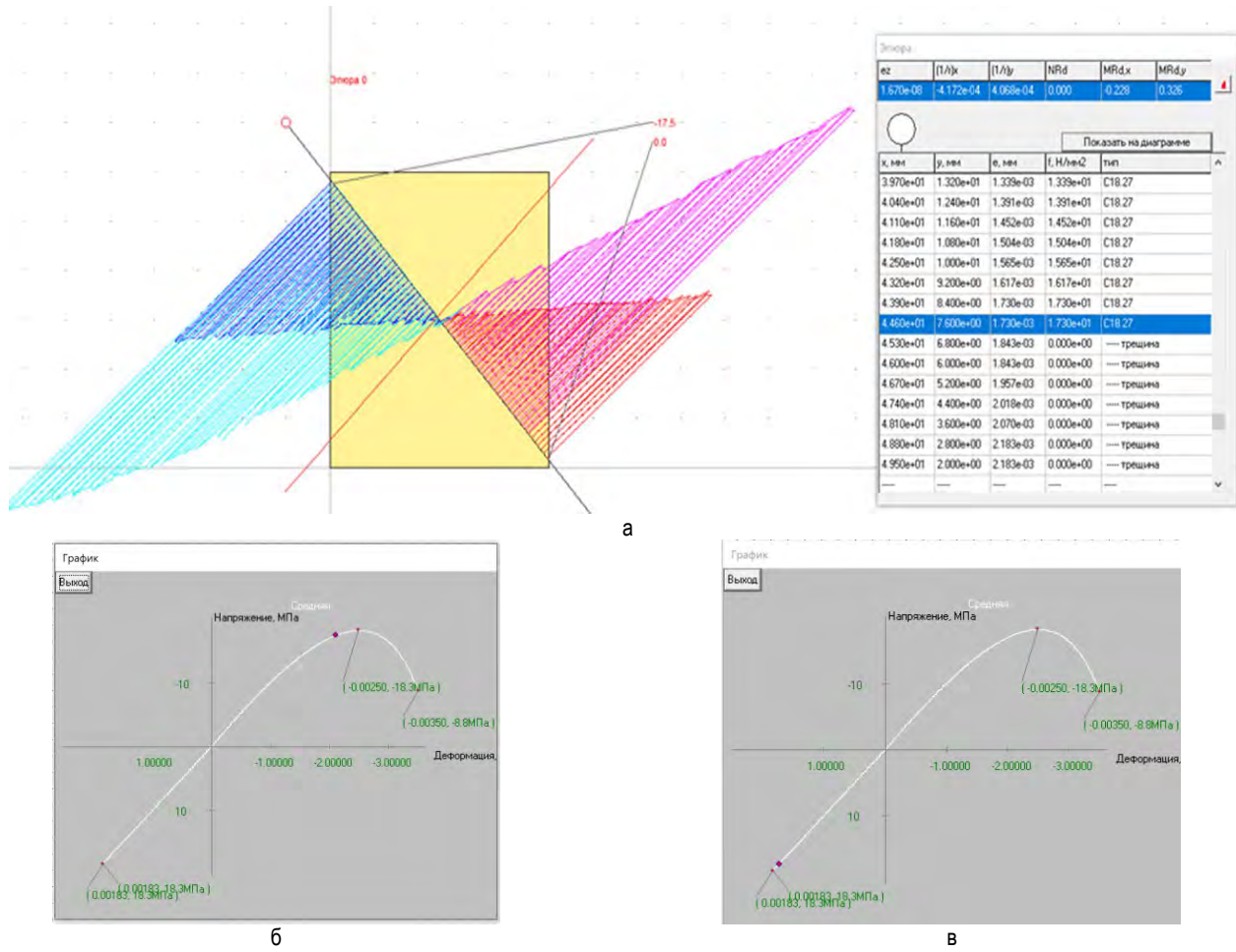
Расчет обрешетки

Рассмотрим пример расчета косоизгибаемой деревянной обрешетки кровли с уклоном 35° к горизонту и расстоянием между опорами $l_d = 1200$ мм (п. 7.2.13 [28]). Размеры поперечного сечения бруска обрешетки приняты $b \times h = 50 \times 60$ мм. Изгибающие моменты от внешних воздействий для двух комбинаций нагружения равны: $M_{Ed,y,I} = 0,097$ кН·м; $M_{Ed,x,I} = 0,068$ кН·м; $M_{Ed,y,II} = 0,311$ кН·м; $M_{Ed,x,II} = 0,218$ кН·м ($M_{Ed,I} = 0,118$ кН·м; $M_{Ed,II} = 0,38$ кН·м). Среднее значение модуля упругости вдоль волокон древесины – $E_{0,mean} = 10000$ МПа (таблица 6.2 [1]). Расчетные значения сопротивления древесины изгибаемого бруска при сжатии и растяжении для двух комбинаций с учетом меньшего значения коэффициента (косоизгибаемая обрешетка работает преимущественно в направлении большей стороны), учитывающего изменение прочности древесины в зависимости от отношения стандартной высоты сечения к фактической высоте $k_h = 1,2$: $f_{c,d,I} = f_{t,d,I} = 16,25$ МПа; $f_{c,d,II} = f_{t,d,II} = 18,27$ МПа.

Результаты расчета прочности косоизгибаемой деревянной обрешетки кровли по деформационной модели следующие: $M_{Rd,y,I} = 0,286$ кН·м; $M_{Rd,x,I} = 0,199$ кН·м; $M_{Rd,y,II} = 0,311$ кН·м; $M_{Rd,x,II} = 0,218$ кН·м, что соответствует векторной сумме изгибающих моментов $M_{Rd,I} = 0,348$ кН·м; $M_{Rd,II} = 0,398$ кН·м. Условие прочности выполняется с коэффициентами запаса прочности для двух комбинаций нагружения: $k_I = 0,348/0,118 = 2,95$; $k_{II} = 0,398/0,38 = 1,05$.

Распределение относительных деформаций и нормальных напряжений по поперечному сечению обрешетки для второй комбинации нагружения представлено на рисунке 2. На диаграммах деформирования точками обозначены относительные деформации и нормальные напряжения в наиболее нагруженных элементарных площадках в сжатой и растянутой зонах. Расчет косоизгибаемой деревянной обрешетки показывает, что его разрушение происходит плавно и начинается в растянутой зоне с разрыва наиболее растянутых волокон древесины и образованием трещин нормального отрыва при изгибающих моментах $M_{cr,y,II} = 0,302$ кН·м; $M_{cr,x,II} = 0,212$ кН·м с последующим увеличением воспринимаемого усилия.

Начальный прогиб косоизгибаемой обрешетки для характеристических значений первой комбинации действующих нагрузок $M_{E_k,y,I} = 0,066$ кН·м; $M_{E_k,x,I} = 0,046$ кН·м вычисляем по формулам (7) и (8), исходя из осевых кривизн, полученных из расчета по деформационной модели при $E_{0,mean} = 9500$ МПа: $(1/r)_{x,inst} = 7,061 \cdot 10^{-5}$; $(1/r)_{y,inst} = 7,046 \cdot 10^{-5}$ (коэффициент $\alpha_k = 2,13/384$); $u_{x,inst} = 0,56$ мм; $u_{y,inst} = 0,55$ мм; $u_{inst} = 0,78$ мм. Для вычисления прогиба от ползучести древесины при действии постоянной нагрузки (соответствующие $M_{E_k,y,q,I} = 0,013$ кН·м; $M_{E_k,x,q,I} = 0,009$ кН·м) выполняем расчет для получения осевых кривизн: $(1/r)_{x,q,inst} = 1,37 \cdot 10^{-5}$; $(1/r)_{y,q,inst} = 1,366 \cdot 10^{-5}$. Начальный прогиб обрешетки от постоянной нагрузки $u_{q,inst} = 0,15$ мм. Тогда прогиб от действия ползучести древесины ($k_{def} = 0,6$) составляет: $u_{q,crep} = u_{q,inst} \cdot k_{def} = 0,15 \cdot 0,6 = 0,09$ мм. Полный прогиб с учетом ползучести древесины равен $u_{Ed} = u_{inst} + u_{q,crep} = 0,78 + 0,09 = 0,87$ мм < $u_{Cd} = (1/150) \cdot l_d = (1/150) \cdot 1200 = 8$ мм – предельное состояние эксплуатационной пригодности обрешетки по прогибам обеспечивается.

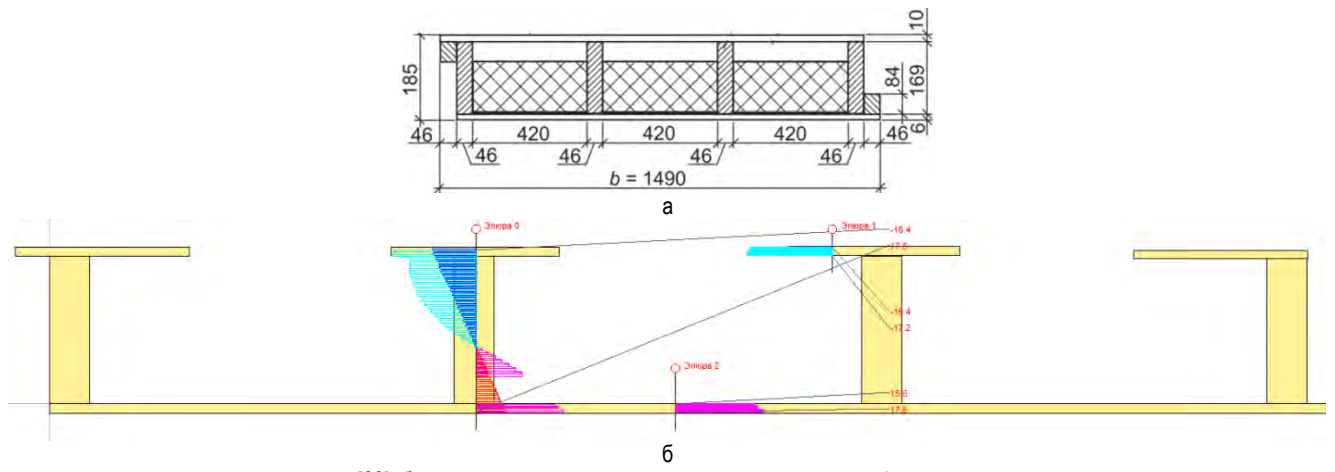


а – распределение относительных деформаций и напряжений по высоте поперечного сечения (цифры на выносных линиях – нормальные напряжения в МПа; синим и красным цветом показано распределение по высоте поперечного сечения относительных деформаций соответственно в сжатой и растянутой зонах; голубым и розовым – аналогично, нормальных напряжений); б и в – диаграммы деформирования древесины наиболее сжатой и растянутой грани (розовая точка – значения напряжений и деформаций при заданном нагружении)
Рисунок 2 – Результаты расчета деревянной обрешетки по деформационной модели

Расчет плиты с фанерными обшивками

Выполним по деформационному расчету проверку по предельным состояниям прочности и эксплуатационной пригодности плиты с фанерными обшивками шириной 1490 мм и расчетным пролетом $l_d = 4930$ мм (п. 8.11 [28]). Соединение обшивок с ребрами плиты клеевое, жесткое. Поперечное сечение плиты с геометрическими размерами представлено на рисунке 3а. Эффективная ширина поперечного

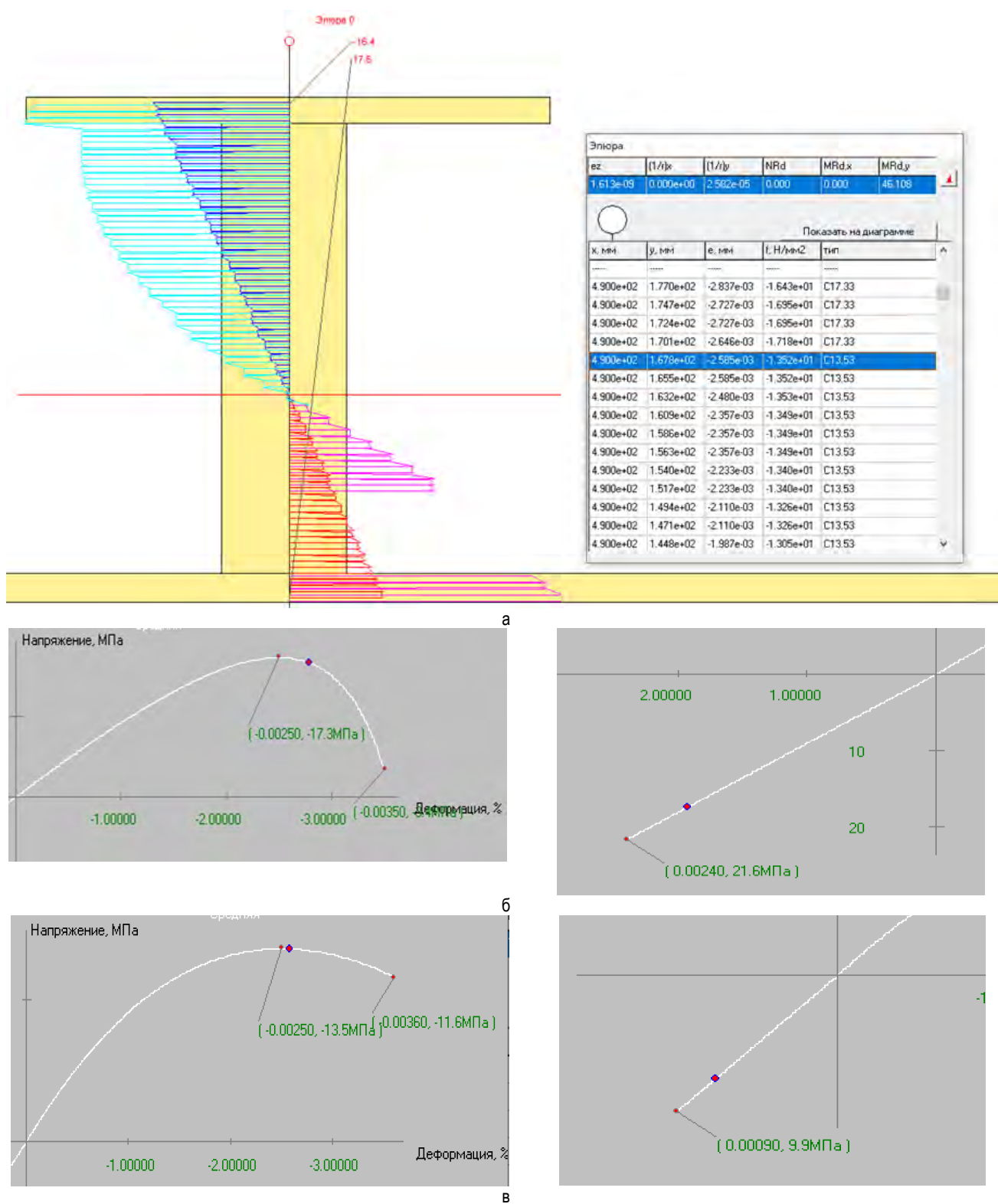
сечения верхней обшивки $b_{f,c} = 786$ мм, расчетная ширина нижней обшивки $b_{f,t} = 1490$ мм (рисунок 3б). Изгибающий момент от равномерно распределенных нагрузок $M_{Ed} = 14,76$ кН·м. Среднее значение модуля упругости вдоль волокон древесины ребер – $E_{w,mean} = 11000$ МПа, фанеры – $E_{f,mean} = 9000$ МПа. Расчетные значения сопротивления древесины при сжатии и растяжении равны: для ребер – $f_{w,c,d} = 13,53$ МПа и $f_{w,t,d} = 9,85$ МПа; для фанеры – $f_{f,c,d} = 17,33$ МПа и $f_{f,t,d} = 24$ МПа.



а – с геометрическими размерами по [28]; б – расчетное с распределением относительных деформаций и нормальных напряжений по высоте сечения (цифры красным цветом – нормальные напряжения в наиболее растянутых и сжатых волокнах плиты)
Рисунок 3 – Поперечное сечение плиты с фанерными обшивками

Распределение относительных деформаций и нормальных напряжений по поперечному сечению плиты с обшивками приведено на рисунке 3б и рисунке 4. На диаграммах деформирования точками обозначены относительные деформации и нормальные напряжения в наиболее нагруженных элементарных площадках в сжатой верхней и растянутой нижней обшивках в предельном по прочности состоянии.

Расчет плиты с обшивками показывает, что ее разрушение происходит плавно и начинается в растянутой зоне с разрыва наиболее растянутых волокон древесины ребер с образованием трещин нормального отрыва при изгибающих моментах $M_{cr} = 32,5 \text{ кН}\cdot\text{м}$ с последующим перераспределением растягивающих усилий на нижнюю обшивку и увеличением воспринимаемого усилия до $M_{Rd} = 46,11 \text{ кН}\cdot\text{м}$.



б – верхней и нижней обшивки; в – ребра
Рисунок 4 – Распределение относительных деформаций и нормальных напряжений по поперечному сечению плиты с обшивками (а) с диаграммами деформирования крайних сжатых и растянутых волокон

Проверку клеевых соединений обшивок с продольными ребрами на сдвиг производим из условия:

$$T_{v,mean,d} \leq f_{v,90,d} \cdot \quad (7)$$

Расчетное значение сопротивления при сдвиге материала обшивок $f_{v,90,d} = 1,66$ МПа.

Напряжения сдвига в клеевых соединениях обшивок с ребрами вычисляем по формуле:

$$T_{v,mean,d} = \frac{\sigma_{f,d,1} + \sigma_{f,d,2}}{2} \cdot \frac{A_f}{A_v} \quad (8)$$

Среднее значение нормальных напряжений в предельном по прочности состоянии ($M_{Rd} = 46,11$ кН·м) в обшивке вычисляем из их значений в крайних волокнах (деформационный расчет): верхней – $(\sigma_{f,d,1} + \sigma_{f,d,2})/2 = (16,43 + 17,18)/2 = 16,81$ МПа; нижней – $(\sigma_{f,d,1} + \sigma_{f,d,2})/2 = (15,79 + 17,62)/2 = 16,71$ МПа. Площадь расчетного поперечного сечения обшивки: верхней – $A_f = 786 \cdot 10 = 7860$ мм²; нижней – $A_f = 1444 \cdot 10 = 14440$ мм². Площадь контакта в клеевых соединениях ребер с обшивками для верхней и нижней обшивок равна половине пролета плиты умноженной на суммарную ширину ребер: $A_v = (4930/2) \cdot 46 \cdot 4 = 453560$ мм². Тогда по формуле (10) для обшивок: верхней – $T_{v,mean,d} = 0,29$ МПа; нижней – $T_{v,mean,d} = 0,53$ МПа, что меньше $f_{v,90,d} = 1,66$ МПа – предельное состояние несущей способности плиты на сдвиг по клеевым соединениям обшивки с продольными ребрами обеспечивается. При действующем на плиту изгибающем моменте $M_{Ed} = 14,76$ кН·м < $M_{Rd} = 46,11$ кН·м это предельное состояние тем более обеспечивается. При необходимости можно проверить любое поперечное сечение плиты при сдвиге при действующем в нем нормальных напряжениях в обшивке и соответствующей длине зоны контакта клеевого соединения.

Начальный прогиб плиты для характеристического значения изгибающего момента от действующих нагрузок $M_{Ek} = 10,24$ кН·м вычисляем по формулам (7) и (8), исходя из кривизны, полученной из расчета по деформационной модели: $(1/r)_{inst} = 3,98 \cdot 10^{-5}$; (коэффициент $\alpha_k = 5/384$); $U_{inst} = 12,6$ мм. Для вычисления прогиба от ползучести древесины при действии постоянной нагрузки ($M_{Ek,q} = 4,59$ кН·м) выполняем расчет для получения осевых кривизн: $(1/r)_{q,inst} = 1,76 \cdot 10^{-5}$. Начальный прогиб обрешетки от постоянной нагрузки $U_{q,inst} = 5,56$ мм. Тогда прогиб от действия ползучести древесины ($K_{def} = 0,8$) составляет: $U_{q,crep} = U_{q,inst} \cdot K_{def} = 5,56 \cdot 0,8 = 4,45$ мм. Полный прогиб с учетом ползучести древесины равен $U_{Ed} = U_{inst} + U_{q,crep} = 12,6 + 4,45 = 17,05$ мм < $U_{Cd} = (1/175) \cdot l_d = (1/175) \cdot 4930 = 28,2$ мм – предельное состояние эксплуатационной пригодности плиты по прогибам обеспечивается.

Расчет прочности дощатоклееной арки

Выполним проверку предельного состояния по прочности дощатоклееной арки с размерами поперечного сечения приняты $b \times h = 250 \times 1200$ мм при действии рекомендуемой комбинации усилий IV: $M_{Ed,IV} = 960,1$ кН·м; $N_{Ed,IV} = 577,74$ кН (п. 10.23 [28]). Среднее значение модуля упругости вдоль волокон древесины – $E_{0,mean} = 14200$ МПа. Расчетные значения сопротивления древесины $f_{c0d,IV} = f_{m,d,IV} = 20,48$ МПа.

Распределение относительных деформаций и нормальных напряжений по поперечному сечению дощатоклееной балки для IV комбинации нагружения представлено на рисунке 5. Расчет балки показывает, что ее разрушение начинается в растянутой зоне с достижением растянутыми волокнами предельных деформаций при комбинации усилий: $M_{Rd,IV} = 1282,5$ кН·м; $N_{Rd,IV} = 775,5$ кН, что меньше действующих усилий – прочность обеспечена.

Заключение

Используя примеры расчета, приведенные в СП 5.05.02-2023 «Деревянные конструкции. Правила расчета» [28], показаны преимущества диаграммного подхода к расчету деревянных конструкций в рамках СП 5.05.01-2021 «Деревянные конструкции» [1], которые заключаются в возможности вычисления параметров напряженно-деформированного состояния деревянных конструкций любой формы поперечного сечения, состоящего из материалов с различными физико-механическими характеристиками, на любой стадии работы под нагрузкой.

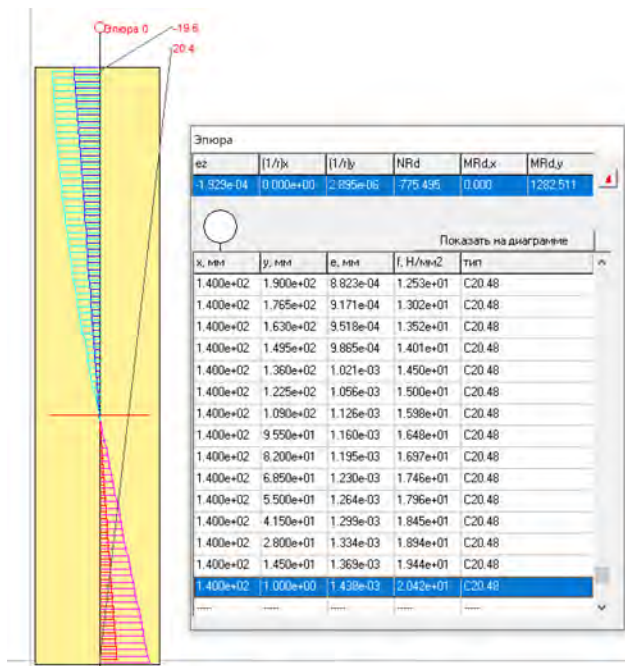


Рисунок 5 – Результаты расчета и распределение нормальных напряжений и относительных деформаций дощатоклееной балки по деформационной модели

Предлагаемый диаграммный подход к расчету деревянных конструкций имеет прозрачный физический смысл, позволяет устанавливать картину разрушения конструкции исходя из наиболее слабой ее зоны, производить проверку прочности контактного шва между различными древесными материалами в любом поперечном сечении по его длине.

Методика расчета деревянных элементов позволяет более рационально решать задачи в области их проектирования для вновь возводимых конструкций, а также для усиления существующих.

В дальнейшем в деформационном подходе к расчету деревянных элементов следует рассмотреть вопросы нормирования диаграмм деформирования древесины при различных воздействиях, учета длительности действия статической нагрузки, особенности работы усиленных под нагрузкой деревянных элементов.

Список цитированных источников

1. Деревянные конструкции : СП 5.05.01-2021. – Введ. 01.06.2021. – Минск : М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2021. – 111 с.
2. fib Model Code for Concrete Structures 2010 / International Federation for Structural Concrete (fib). – 2013. – 402 p. – <https://doi.org/10.1002/9783433604090>.
3. Бетонные и железобетонные конструкции : СП 5.03.01-2020. – Введ. 16.11.2020. – Минск : М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2020. – 236 с.
4. Залесов, А. С. Расчет деформаций железобетонных конструкций по новым нормативным документам / А. С. Залесов, Т. А. Мухамедиев, Е. А. Чистяков // Бетон и железобетон. – 2002. – № 6. – С. 12–16.
5. Расчет прочности железобетонных конструкций при действии изгибающих моментов и продольных сил по новым нормативным документам / А. И. Залесов [и др.] // Бетон и железобетон. – 2002. – № 2. – С. 21–25.
6. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Правила проектирования : СП 164.1325800.2014. – Введ. 2014. – М. : Минстрой России, 2015. – 51 с.
7. Modeling of Behavior of the Bending Reinforced Concrete Structures Under Load / D. Lazouski [et al.] // Sustainable and Digital Building. Proceedings of the International Conference, 2022 / Editors: F. Gaspar, A. Mateus. – Luxembourg : Springer Nature Switzerland AG, 2023. – P. 279–291.

8. Карпенко, Н. И. Расчетные зависимости для диаграммы деформирования арматуры с физической площадкой текучести / Н. И. Карпенко, С. Н. Карпенко, В. А. Ерышев // Технология текстильной промышленности. – 2016. – № 5. – С. 206–210.
9. Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования : СП 266.1325800.2016. – Введ. 01.07.2016. – Москва : Минстрой России, 2017. – 123 с.
10. Конструкции сталежелезобетонные покрытий и перекрытий. Правила проектирования : ТКП 45-5.03-16-2005 (02250). – Минск : М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2006. – 71 с.
11. Методические рекомендации по расчету и проектированию сталежелезобетонных перекрытий. – М. : Федеральный центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в строительстве, 2018. – 62 с.
12. Методическое пособие по расчету и проектированию сталежелезобетонных конструкций с жесткой арматурой. – М. : Федеральный центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в строительстве, 2018. – 49 с.
13. Руководство по проектированию железобетонных конструкций с жесткой арматурой. – М. : Стройиздат, 1978. – 57 с.
14. EN 1994-1-1:2005. Еврокод 4. Проектирование сталежелезобетонных конструкций. – Ч. 1. Общие правила для зданий и сооружений. – М., 2011. – 123 с.
15. Джонсон, Р. П. Руководство для проектировщиков к Еврокоду 4 EN 1994-1-1. Проектирование сталежелезобетонных конструкций / Р. П. Джонсон ; М-во образования и науки Росс. Федерации, ФГБОУ ВПО «Моск. гос. строит. ун-т» ; науч. ред. пер. В. О. Алмазов, А. Н. Томилин. – М. : МГСУ, 2013. – 2-е изд. – 414 с.
16. Конструкции сталежелезобетонные покрытий и перекрытий. Правила проектирования : ТКП 45-5.03-16-2005 (02250). – Минск : М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2006. – 71 с.
17. Семенов, В. А. Сталежелезобетонные конструкции. Область применения и основные положения СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования». Преимущества сталежелезобетонных конструкций по сравнению с традиционными решениями. Моделирование сталежелезобетонных конструкций с помощью современного инженерного ПО для проектировщиков [Электронный ресурс] / В.А. Семенов // Презентация: Ассоциация развития стального строительства (АРСС). – Режим доступа: https://steel-fabrication.ru/mediasent/5_Владимир%20Семенов_Техсофт.pdf. – Дата доступа: 01.07.2024.
18. Карпенко, Н. И. К расчёту прочности, жёсткости и трещиностойкости внецентренно сжатых железобетонных элементов с применением нелинейной деформационной модели / Н. И. Карпенко, Б. С. Соколов, О. В. Радаikin // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2013. – № 4 (26). – С. 113–120. – EDN: RSTDVV.
19. Кудинов, О. В. Новый подход к оценке прочности сталежелезобетонных перекрытий / О. В. Кудинов // Бетон и железобетон. – 2010. – № 2 (563). – С. 14–16.
20. Арленинов, П. Д. Современное состояние нелинейных расчетов железобетонных конструкций / П. Д. Арленинов, С. Б. Крылов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2017. – № 3. – С. 50–53. – EDN: ZFIVKZ.
21. Карпенко, Н. И. Исходные и трансформированные диаграммы деформирования бетона и арматуры / Н. И. Карпенко, Т. А. Мухамедиев, А. Н. Петров // Напряженно-деформированное состояние бетонных и железобетонных конструкций : сб. статей / Научно-исследовательский институт бетона и железобетона. – М. : Стройиздат, 1986. – С. 7–25.
22. EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1 : General rules and rules for buildings. – 2004. – P. 33–34.
23. Деформационный подход к вычислению расчетных значений сопротивления сжатию каменных и армокаменных элементов в рамках проверок предельного состояния несущей способности / А. М. Хаткевич [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия Ф, Строительство. Прикладные науки. – 2023. – № 2 (34). – С. 2–9. – <https://doi.org/10.52928/2070-1683-2023-34-2-2-9>.
24. Нелинейный расчет изгибаемых сталежелезобетонных элементов / Д. Н. Лазовский [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия Ф, Строительство. Прикладные науки. – 2024. – № 2 (37). – С. 9–23. – <https://doi.org/10.52928/2070-1683-2024-37-2-9-23>.
25. Akhaveissy, A. H. The DSC model for the nonlinear analysis of in-plane loaded masonry structures / A. H. Akhaveissy // The Open Civil Engineering J. – 2012. – Vol. 6. – P. 200–214.
26. Уласевич, В. П. Деформационный расчет бескаркасных арочных покрытий из стальных тонкостенных холодногнутых профилей / В. П. Уласевич, Д. А. Жданов // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2015. – № 1. – С. 66–73.
27. Уласевич, В. П. Деформационный расчет и исследование напряженно-деформированных состояний пологих одноосевых распорных систем: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 01.02.03 / В. П. Уласевич ; ЦНИИСК им. Кучеренко. – М., 1984. – 24 с.
28. Деревянные конструкции. Правила расчета : СП 5.05.02-2023. – Минск : М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2023. – 129 с.
29. Лукаш, П. А. Расчет пологих оболочек и плит с учетом физической и геометрической нелинейности / П. А. Лукаш // Расчет конструкций, работающих в упругопластической стадии : сб. тр. ЦНИИСК. – М. : Госстройиздат, 1961. – Вып.7. – С. 268–320.
30. Леннов, В. Г. Экспериментальное исследование древесины сосны на сжатие и растяжение вдоль волокон с учетом длительного воздействия нагрузок / В. Г. Леннов // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1958. – № 2. – С. 147–157.
31. Ylinen, A. Über die Bestimmung der zeitbedingten elastischen und Festigkeitseigenschaften des Holzes mit Hilfe eines allgemeinen nichtlinear visko-elastischen reologischen Modelles / A. Ylinen // Holz als Roh-und Werkstoff. – 1965. – Vol. 23, № 5. – S.193–196.
32. Вареник, К. А. Аппроксимация диаграммы деформирования древесины / К. А. Вареник // Вестник Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого. – 2013. – Т. 1, № 75. – С. 60–64.
33. Немировский, Ю. В. Расчёт и рациональное проектирование деревянных стержневых элементов / Ю. В. Немировский // Современные проблемы совершенствования и развития конструкций в строительстве и транспорте: сб. науч. трудов III Междунар. науч.-техн. конф. – Самара : Изд-во СамГАСУ, 2005. – С. 247–251.
34. Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий : ТКП EN 1992-1-1-2009. – Введ. 01.01.10. – Минск : М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2010. – 112 с.
35. Хаткевич, А. М. Деформационный подход к моделированию напряженно-деформированного состояния сжатых элементов из кирпичной кладки, усиленных под нагрузкой железобетонной обоймой / А. М. Хаткевич, Д. Н. Лазовский, Д. О. Глухов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2023. – № 3 (35). – С. 21–27. – <https://doi.org/10.52928/2070-1683-2023-35-3-21-27>.

References

1. Derevyannye konstrukcii : SP 5.05.01-2021. – Vved. 01.06.2021. – Minsk : M-vo arhitektury i stroitel'stva Resp. Belarus', 2021. – 111 s.
2. fib Model Code for Concrete Structures 2010 / International Federation for Structural Concrete (fib). – 2013. – 402 p. – <https://doi.org/10.1002/9783433604090>.
3. Betonnyye i zhelezobetonnyye konstrukcii : SP 5.03.01-2020. – Vved. 16.11.2020. – Minsk : M-vo arhitektury i stroitel'stva Resp. Belarus', 2020. – 236 s.
4. Zalesov, A. S. Raschet deformacij zhelezobetonnyh konstrukcij po novym normativnym dokumentam / A. S. Zalesov, T. A. Muhamediev, E. A. Chistyakov // Beton i zhelezobeton. – 2002. – № 6. – S. 12–16.
5. Raschet prochnosti zhelezobetonnyh konstrukcij pri dejstvii izgibayushchih momentov i prodol'nyh sil po novym normativnym dokumentam / A. I. Zalesov [i dr.] // Beton i zhelezobeton. – 2002. – № 2. – S. 21–25.

6. Usilenie zhelezobetonnykh konstrukcij kompozitnymi materialami. Pravila proektirovaniya : SP 164.1325800.2014. – Vved. 2014. – M. : Minstroj Rossii, 2015. – 51 s.
7. Modeling of Behavior of the Bending Reinforced Concrete Structures Under Load / D. Lazouski [et al.] // Sustainable and Digital Building. Proceedings of the International Conference, 2022 / Editors: F. Gaspar, A. Mateus. – Luxembourg : Springer Nature Switzerland AG, 2023. – P. 279–291.
8. Karpenko, N. I. Raschetnye zavisimosti dlya diagrammy deformirovaniya armatury s fizicheskoj ploshchadkoj tekuchesti / N. I. Karpenko, S. N. Karpenko, V. A. Eryshev // Tekhnologiya tekstil'noj promyshlennosti. – 2016. – № 5. – S. 206–210.
9. Konstrukcii stalezhelezobetonnye. Pravila proektirovaniya : SP 266.1325800.2016. – Vved. 01.07.2016. – Moskva : Minstroj Rossii, 2017. – 123 s.
10. Konstrukcii stalezhelezobetonnye pokrytij i perekrytij. Pravila proektirovaniya : TKP 45-5.03-16-2005 (02250). – Minsk : M-vo arhitektury i stroitel'stva Resp. Belarus', 2006. – 71 s.
11. Metodicheskie rekomendacii po raschetu i proektirovaniyu stalezhelezobetonnykh perekrytij. – M. : Federal'nyj centr normirovaniya, standartizacii i ocenki sootvetstviya v stroitel'stve, 2018. – 62 s.
12. Metodicheskoe posobie po raschetu i proektirovaniyu stalezhelezobetonnykh konstrukcij s zhestkoj armaturoj. – M. : Federal'nyj centr normirovaniya, standartizacii i ocenki sootvetstviya v stroitel'stve, 2018. – 49 s.
13. Rukovodstvo po proektirovaniyu zhelezobetonnykh konstrukcij s zhestkoj armaturoj. – M. : Strojizdat, 1978. – 57 s.
14. EN 1994-1-1:2005. Evrokod 4. Proektirovanie stalezhelezobetonnykh konstrukcij. – CH. 1. Obshchie pravila dlya zdaniy i sooruzhenij. – M., 2011. – 123 s.
15. Dzhonson, R. P. Rukovodstvo dlya proektirovshchikov k Evrokodu 4 EN 1994-1-1. Proektirovanie stalezhelezobetonnykh konstrukcij / R. P. Dzhonson ; M-vo obrazovaniya i nauki Ross. Federacii, FGBOU VPO «Mosk. gos. stroit. un-t» ; nauch. red. per. V. O. Almazov, A. N. Tomilin. – M. : MGSU, 2013. – 2-e izd. – 414 s.
16. Konstrukcii stalezhelezobetonnye pokrytij i perekrytij. Pravila proektirovaniya : TKP 45-5.03-16-2005 (02250). – Minsk : M-vo arhitektury i stroitel'stva Resp. Belarus', 2006. – 71 s.
17. Semenov, V. A. Stalezhelezobetonnye konstrukcii. Oblast' primeneniya i osnovnye polozeniya SP 266.1325800.2016 «Konstrukcii stalezhelezobetonnye. Pravila proektirovaniya». Preimushchestva stalezhelezobetonnykh konstrukcij po sravneniyu s traditsionnymi resheniyami. Modelirovanie stalezhelezobetonnykh konstrukcij s pomoshch'yu sovremennogo inzhenernogo PO dlya proektirovshchikov [Elektronnyj resurs] / V. A. Semenov // Prezentaciya: Associaciya razvitiya stal'nogo stroitel'stva (ARSS). – Rezhim dostupa: https://steel-fabrication.ru/mediatsentr/5_Vladimir%20Semenov_Tekhsoft.pdf. – Data dostupa: 01.07.2024.
18. Karpenko, N. I. K raschyotu prochnosti, zhyostkosti i treshchinostyokosti vnecentrenno szhatyh zhelezobetonnykh elementov s primeneniem nelinejnoy deformacionnoj modeli / N. I. Karpenko, B. S. Sokolov, O. V. Radajkin // Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. – 2013. – № 4 (26). – S. 113–120. – EDN: RSTDVV.
19. Kudinov, O. V. Novyj podhod k ocenke prochnosti stalezhelezobetonnykh perekrytij / O. V. Kudinov // Beton i zhelezobeton. – 2010. – № 2 (563). – S. 14–16.
20. Arleninov, P. D. Sovremennoe sostoyanie nelinejnykh raschetov zhelezobetonnykh konstrukcij / P. D. Arleninov, S. B. Krylov // Sejsmostojkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij. 2017. – № 3. – S. 50–53. – EDN: ZFIVKZ.
21. Karpenko, N. I. Iskhodnye i transformirovannye diagrammy deformirovaniya betona i armatury / N. I. Karpenko, T. A. Muhamediev, A. N. Petrov // Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie betonnykh i zhelezobetonnykh konstrukcij : sb. statej / Nauchno-issledovatel'skij institut betona i zhelezobetona. – M. : Strojizdat, 1986. – S. 7–25.
22. EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1 : General rules and rules for buildings. – 2004. – P. 33–34.
23. Deformacionnyj podhod k vychisleniyu raschetnykh znachenij soprotivleniya szhatiyu kamennykh i armokamennykh elementov v ramkah proverok predelnogo sostoyaniya nesushchej sposobnosti / A. M. Hatkevich [i dr.] // Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F, Stroitel'stvo. Prikladnye nauki. – 2023. – № 2 (34). – S. 2–9. – <https://doi.org/10.52928/2070-1683-2023-34-2-9>.
24. Nelinejnyj raschet izgibaemykh stalezhelezobetonnykh elementov / D. N. Lazovskij [i dr.] // Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F, Stroitel'stvo. Prikladnye nauki. – 2024. – № 2 (37). – S. 9–23. – <https://doi.org/10.52928/2070-1683-2024-37-2-9-23>.
25. Akhaveissy, A. H. The DSC model for the nonlinear analysis of in-plane loaded masonry structures / A. H. Akhaveissy // The Open Civil Engineering J. – 2012. – Vol. 6. – P. 200–214.
26. Ulasevich, V. P. Deformacionnyj raschet beskarkasnykh arochnykh pokrytij iz stal'nykh tonkostennykh holodnogutykh profilej / V. P. Ulasevich, D. A. Zhdanov // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura. – 2015. – № 1. – S. 66–73.
27. Ulasevich, V. P. Deformacionnyj raschet i issledovanie napryazhenno-deformirovannykh sostoyanij pologih odnopoyasnykh raspornykh sistem: avtoref. dis. ...kand. tekhn. nauk: 01.02.03 / V. P. Ulasevich ; CNIISK im. Kucherenko. – M., 1984. – 24 s.
28. Derevyannye konstrukcii. Pravila rascheta : SP 5.05.02-2023. – Minsk : M-vo arhitektury i stroitel'stva Resp. Belarus', 2023. – 129 s.
29. Lukash, P. A. Raschet pologih obolochek i plit s uchetoj fizicheskoj i geometricheskoj nelinejnosti / P. A. Lukash // Raschet konstrukcij, rabotayushchih v uprugoplasticheskoj stadii : sb. tr. CNIISK. – M. : Gosstrojizdat, 1961. – Vyp. 7. – S. 268–320.
30. Lennov, V. G. Eksperimental'noe issledovanie drevesiny sosny na szhatie i rastyazhenie vdol' volokon s uchetoj dilitel'nogo vozdejstviya nagruzok / V. G. Lennov // Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arhitektura. – 1958. – № 2. – S. 147–157.
31. Ylinen, A. Uber die Bestimmung der zeitbedingten elastischen und Festigkeitseigenschaften des Holzes mit Hilfe eines allgemeinen nichilinear visko-elastischen reologischen Modelles / A. Ylinen // Holz als Roh-und Werkstoff. – 1965. – Vol. 23, № 5. – S. 193–196.
32. Varenik, K. A. Approksimaciya diagrammy deformirovaniya drevesiny / K. A. Varenik // Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta im. Yaroslava Mudrogo. – 2013. – T. 1, № 75. – S. 60–64.
33. Nemirovskij, YU. V. Raschyot i racional'noe proektirovanie derevyannykh sterzhnevnykh elementov / YU. V. Nemirovskij // Sovremennye problemy sovershenstvovaniya i razvitiya konstrukcij v stroitel'stve i transporte: sb. nauch. trudov III Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. – Samara : Izd-vo SamGASU, 2005. – S. 247–251.
34. Evrokod 2. Proektirovanie zhelezobetonnykh konstrukcij. CHast' 1-1. Obshchie pravila i pravila dlya zdaniy : TKP EN 1992-1-1-2009. – Vved. 01.01.10. – Minsk : M-vo arhitektury i stroitel'stva Resp. Belarus', 2010. – 112 s.
35. Hatkevich, A. M. Deformacionnyj podhod k modelirovaniyu napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya szhatyh elementov iz kirpichnoj kladki, usilennykh pod nagruzkoj zhelezobetonnoj obojmoj / A. M. Hatkevich, D. N. Lazovskij, D. O. Gluhov // Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki. – 2023. – № 3 (35). – S. 21–27. – <https://doi.org/10.52928/2070-1683-2023-35-3-21-27>.

Материал поступил 05.07.2024, одобрен 09.07.2024, принят к публикации 09.07.2024