

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПЛОСКОЙ ФОРМЫ ИЗГИБА БАЛОК ИЗ КЛЕЕНОЙ ДРЕВЕСИНЫ

Потеря устойчивости плоской фермы деформирования балок – явление визуально заметное.

В НиТУ проектирования деревянных конструкций (ОСТ 90001-38) и в инструкции [1] в разделах «Расчет деревянных элементов» вообще не рассматриваются изгибаемые элементы, но даются расчеты растянутых и растянуто-изогнутых элементов, сжатых и сжато-изогнутых стержней. Балки не считались элементами и их расчет дан в разделе «Проектирование и расчет деревянных конструкций». Классификацию балок как конструкций (конструктивной формы), а не изгибаемых элементов, имеет смысл использовать в современном нормативном документе.

В п. 150 [1] дается проверка нормальных напряжений в крайних сжатых и растянутых волокнах в случае простого изгиба балок по формуле

$$M/W_{нт} [\sigma_u]. \quad (1)$$

Вопрос устойчивости плоской формы изгиба в п. 158 [1] рассматривался в следующей трактовке: «Необходимо обеспечить боковую устойчивость сжатой части балок (настилом и т.п.) в тех случаях, когда высота сечения превышает ширину его более чем в 3 раза.

Более высокие балки должны быть раскреплены связями жесткости, поставленными на расстоянии не более 15–20-кратной ширины балки при полном использовании допускаемого напряжения изгиба. При неполном использовании напряжения изгиба расстояние между связями может быть увеличено в отношении $[\sigma_u] / \sigma_u$, где σ_u – расчетное напряжение в балке».

В первом абзаце, вероятно, речь идет о прогонах, проектированию которых посвящены предыдущие пункты [1]. При ширине поперечных сечений прогонов 8–12 см и соотношении $h/b \geq 3$ и соответственно высоте сечений 24–36 см потери устойчивости плоской формы изгиба не наблюдалось.

О каком соотношении h/b идет речь во втором абзаце судить трудно. Рассматриваются цельные балки и, допустим, при $b = 15$ см и $h/b = 4$ высота сечения составляет уже $h = 60$ см. Даже при отсутствии в то время дефицита на крупноразмерные пиломатериалы брус с размером стороны 60 см трудно представить. Одна-



В.З. Клименко

профессор кафедры металлических и деревянных конструкций Киевского национального университета строительства и архитектуры, к.т.н., профессор

ко, рекомендация второго абзаца заслуживает внимания.

В НиТУ 122-55 и СНиП II-Б.5 вопрос устойчивости плоской формы изгиба элементов вообще не рассматривается. Это странно по отношению к предыдущим нормативным документам. Тем более, что в этих документах появились *клееные элементы* (без какого-либо объяснения, что это такое).

В формуле для расчета элементов на изгиб

$$M \leq m_u R_u W_{нт} \quad (2)$$

в отличие от формулы (1) появился коэффициент m_u . Можно только догадываться о его природе, впервые названного коэффициентом условий работы элементов. Согласно п. 44 (7.7) коэффициент условий работы принимается для элементов:

1) из досок, брусков и брусьев с размерами сторон сечения менее 15 см, а также клееных элементов, за исключением указанных ниже, – $m_u = 1,0$;

2) для брусьев и клееных элементов сплошного прямоугольного сечения с размерами сторон 15 см и более при отношении высоты сечения к его ширине $h/b \leq 3,5$ – $m_u = 1,15$;

3) для клееных элементов с высотой сечения более 50 см при ширине 10 см и менее – $m_u = 0,85$;

4) для бревен, не имеющих врезок в расчетном сечении, $m_u = 1,2$.

Пункты 1, 2, 4 показывают, что m_u учитывает изменение расчетного сопротивления древесины цельной и клееной с увеличением размеров поперечных сечений элементов. Это соответствует современным представлениям о прочности древесины в элементах конструкций. Если это так, то содержание п. 3 противоречит другим пунктам. При соотношении $h/b \leq 5$ превалирует обеспечение устойчивости плос-

кой формы изгиба. В п. 3 коэффициент m_u наминает коэффициент m в современном расчете устойчивости плоской формы изгиба балок. Другого объяснения коэффициенту m_u в п. 3 автор не находит. Этот комментарий можно рассматривать как пример присутствия в нормативном документе неопределенностей (нечеткостей), чего не должно быть [5].

Отсутствие в НиТУ 122-55 и СНиП II-Б.5 проверки плоской формы деформации изгибаемых и сжато-изгибаемых элементов объясняется ее отсутствием в методе расчета деревянных конструкций по расчетным предельным состоянием, введенном в 1954 г. В Пособии [6] не рассматривается вопрос плоской формы изгибаемых элементов, содержится только расчет на прочность по формуле (2).

Согласно СНиП II-В.4-71 расчет изгибаемых элементов на прочность производится по формуле (п. 4.7)

$$M/W_{\text{расч}} \leq R_{\text{из}} \quad (3)$$

В п. 4.9: «...для обеспечения их поперечной устойчивости... отношение высоты прямоугольного или двутаврового сечения к ширине (речь идет о клееных балках) принимают для балок не более 6. Клееные балки с большим отношением высоты к ширине поперечного сечения подлежат проверке на общую устойчивость».

В этом нормативном документе отсутствует проблема устойчивости плоской формы деформирования балок из клееной древесины. Поэтому рекомендация, касающаяся соотношения $h/b = 6$, на первый взгляд достаточно смелая, но реальна. Балки с соотношением $h/b > 6$ и пролетом $l > 12$ м становятся не рациональными для перекрытия пролета, надо переходить на другие конструктивные формы. С этой позиции соотношение $h/b = 6$ оказывается граничным и, возможно, авторы СНиП II-В.4-71 правы в том, что не видят проблемы устойчивости в плоскости изгиба для балок пролетом $l \leq 12$ м. Осталось неизвестным содержание проверки на общую устойчивость.

Познакомившись с проблемой устойчивости балок в историческом аспекте, перед тем как рассмотреть ее решение в СНиП II-25-80, автор высказывает сомнение в необходимости расчета балок на устойчивость плоской формы деформирования.

Плоская форма деформирования балок – речь идет не об элементах, которые являются объектом норм проектирования, а о балках, являющихся конструкциями частей зданий и сооружений, в которых они работают совместно с другими смежными элементами. В зданиях и сооружениях это балки в балочных клетках, перекрытиях, покрытиях. В зависимости от конструкции этих частей зданий, сооружений несущие балки всегда имеют раскрепления сжатой и часто растянутой кромок: сверху – полом, перекрытием, крышей, снизу – потолком. Жесткое закрепление расположенных сверху элементов пола или прогонов крыши, а снизу балок потолка конструктивно обеспечивает устойчивость плоской формы изгиба главных несущих балок. Подтверждение этого расчетом не требуется. В балочных покрытиях зданий и сооружений нижняя кромка несущих балок может не иметь раскрепления. В балочных клетках с расположением главных и второстепенных балок в одном уровне в габаритах строительной высоты перекрытия обеспечивается раскрепление сжатой зоны главных балок на большую глубину и не требуется раскрепление растянутой зоны.

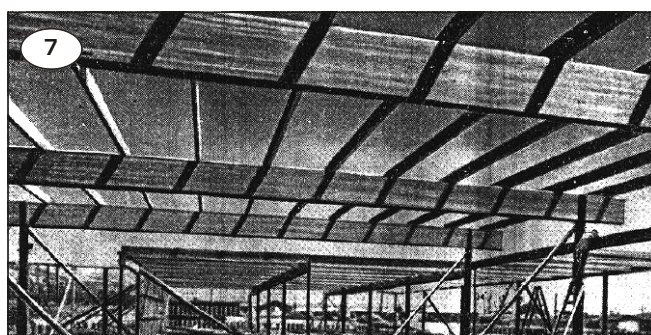
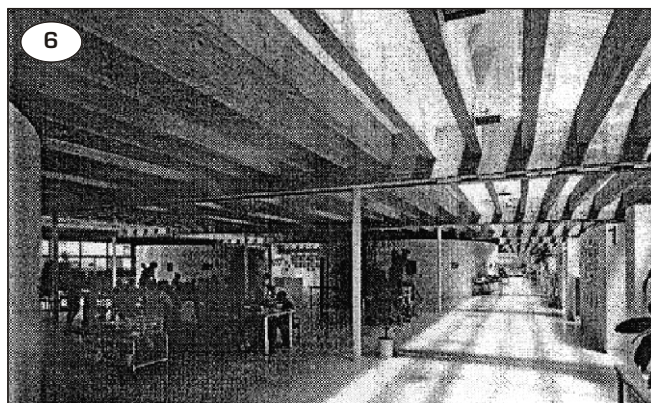
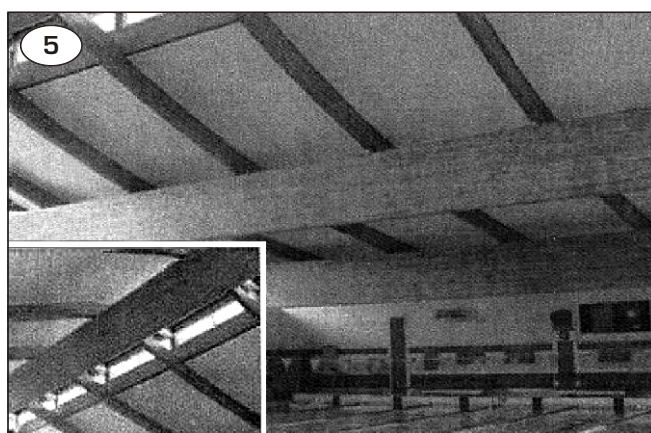
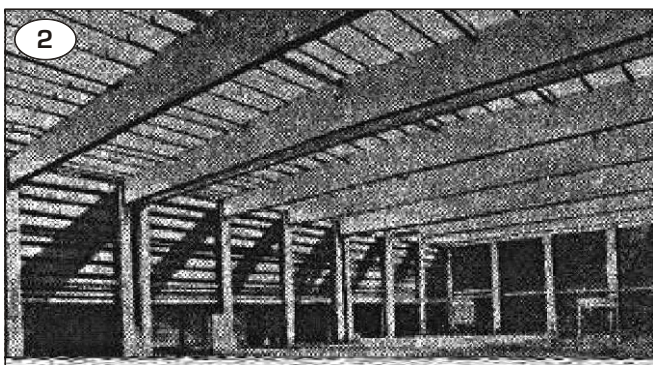
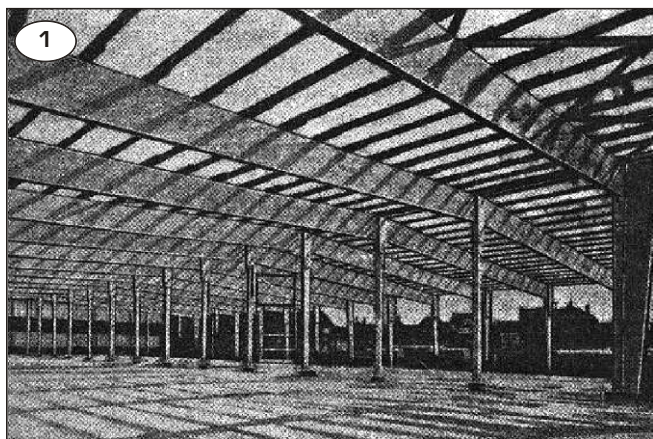
В СНиП II-25-80 рассматриваются в какой-то мере абстрактные изгибаемые элементы без учета того, что нагрузка на них передается от смежных элементов (также балок), обеспечивающих устойчивость главных несущих балок в плоскости изгиба. В упомянутом выше ОСТ 90001-38 можно отметить (и оценить положительно) рациональный подход к решению плоской формы изгиба балок. Такой же подход к проектированию балок принят в новом нормативном документе ДСТУ-Н.

Рассмотрим как решается плоская форма изгиба балок в мировой практике применения балок больших пролетов из клееной древесины. На рисунке показаны покрытия зданий и сооружений пролетом до 20 м. Для этих покрытий характерно отсутствие раскрепления нижних кромок несущих балок. Строительство объектов осуществлено в разное время и с широкой географией. Соотношения h/b и l/h большие и отсутствие раскрепления растянутых кромок балок, скорее всего, не случайно. Достаточно для обеспечения плоской формы изгиба балок жесткого раскрепления сжатых кромок.

Из рассмотренных выше нормативных документов только в [1] приводились четкие реко-

мендации по обеспечению плоской формы изгиба балок, например, как гласит п. 47: «Прогонки должны плотно и прочно закрепляться на верхние части несущих конструкций для предотвращения их выхода из плоскости».

Последующие нормы подобных конструктивных требований не содержали. Более того, вопрос устойчивости балок в плоскости изгиба вообще не поднимался. Автор не владеет информацией о том, как решался этот вопрос в нормативных документах других стран. Но известно из [2], что в проектной практике США устойчивость плоской формы изгиба балок обеспечивается не расчетом, а обязательным выполнением конструктивных требований по раскреплению верхних кромок по длине балок в зависимости от h/b .



Примеры конструкций покрытий:

1, 2 – складские здания (ФРГ); 3 – ресторан в Калабрии (Италия); 4 – сельская библиотека (Канада); 5 – бассейн аквапарка (Польша); 6 – школьный класс (Япония); 7 – рынок торгового центра (США)

СНиП II-25-80 и Пособие [3]. Принимая во внимание историю «*расчета деревянных элементов на устойчивость плоской формы деформирования*», появление расчета в нормах проектирования стало неожиданным. Расчет технически сложный, особенно если провести параллель с расчетом сжато-изгибаемых элементов на прочность по деформированной схеме: в СНиП II-25-80 сохранился расчет, к которому имеется серьезная методологическая претензия. По какой-то причине техническая сложность расчета на устойчивость плоской формы деформирования не стала препятствием для включения его в нормы проектирования. Расчет не обязательно должен быть сложным. Практика выполнения многих сотен курсовых проектов по дисциплине «Деревянные конструкции» засвидетельствовала о несущественном влиянии коэффициента $K_{\text{пм}}$ (формула (24) СНиП) на результаты расчетов. Зачем усложнять расчет, как это сделано в Пособии [3].

Расчет на устойчивость плоской формы деформирования изгибаемых элементов, согласно СНиП II-25-80, следует выполнять по формуле

$$M / M_{\text{бр}} \leq R_u \cdot \quad (4)$$

В Пособии [3] формула (4) названа центральной для проверки устойчивости плоской формы деформирования. Далее цитата: «*Так как задачи плоской формы деформирования решены в упругой постановке, то коэффициенты α и β могут принимать значения больше единицы*»*.

В СНиП II-25-80 и в Пособии [3] пренебрегают тем, что это утверждение противоречит основам сопротивления материалов и теории устойчивости. Автор категорически несогласен с положением норм относительно $\alpha > 1$ и ненаучным обоснованием такого факта в пользу противоестественного физического явления – устойчивости центрально сжатых стержней [6]. Помимо этого, при выводе коэффициента M используется соотношение $E/R_{\text{бр},u} = 200$, что не отвечает физическому явлению. Если метод расчета неадекватно отражает суть физического явления и это вызывает к нему серьезную методологическую претензию, то этот метод не может иметь места в нормативном документе.

В ДСТУ-Н даны конструктивные рекомендации по устройству жестких закреплений по длине несущих балок из плоскости изгиба, имеющих смежные элементы покрытий и перекрытий, для обеспечения плоской формы деформирования.

Методологическое обеспечение подбора рационального поперечного сечения балок. Если коэффициент M в формуле (4) принять как параметр, зависящий от размеров поперечного сечения балки и раскрепления сжатой его кромки, то формулу

$$M = 140 \frac{b^2}{l_p h} k_{\text{ф}} \quad (5)$$

можно использовать для подбора рационального поперечного сечения балок.

Рациональное сечение, отвечающее условию (4), получается при $M = 1$. В случае $M < 1$ условие (4) не выполняется, так как $u > R_u$, что недопустимо. В случае $M > 1$ условие $u < R_u$ удовлетворяет требование норм проектирования. Формула (5) позволяет установить соотношение размеров поперечного сечения балки и расстояния между раскреплениями сжатой кромки l_p при минимальной площади сечения $A_{\text{мин}}$.

Суть методологического обеспечения подбора рационального поперечного сечения балок при сохранении устойчивости плоской формы изгиба следует из сравнительного анализа результатов расчета балок разных пролетов при одинаковой линейно распределенной нагрузке, принятой $q = 0,06 \text{ кН/см}^2$.

Для того, чтобы оценить в подборе $A_{\text{опт}}$ балок влияние только параметров b , h и l_p коэффициент $k_{\text{ф}}$ в формуле (5) принят равным единице, как и все коэффициенты условий работы к расчетным сопротивлениям R_u .

Результаты расчета балок даны в таблице.

Сравним, для примера, расчеты для балки пролетом 10 м (строчки 17–23 табл.).

Не раскрепляем сжатую кромку балки, $l_p = l$. Принимаем размеры поперечного сечения по графам 3, 4 с соотношением $h/b > 2,7$ (графа 5). Коэффициент $M < 1$ (графа 8): условие прочности по формуле (4) не выполняется (графа 10).

* Приведенная цитата относится к расчету изгибаемых элементов по формуле (4) (формула (23)) СНиП и сжато-изгибаемых элементов по формуле (33) СНиП, в которой фигурирует кроме M коэффициент продольного изгиба α . Подробно об устойчивости плоской формы изгиба сжато-изгибаемых элементов в [4].

Результаты расчета балок

№ п/п	Геометрические размеры, см			$\frac{h}{b}$	Закрепление по верхней кромке	l_p , см	M	l_p при $M=1$	Напряжения, МПа		A, см ²	
	l	b	h						σ	R_u		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	400	10	73,6	2,36	$l_p = l$	400	1,48	593	$\ll R_u$	13	236	
2		8	26,3	3,3			$1_{\text{н}} = 1/2$		200		0,852	$> R_u$
3		8,6	25,4	2,95	$l_p = l$	400		1,02			12,72	218
4		8	26,3	3,3	$l_p = a$			100			2,27	$\ll R_u$
5		600	10	34	3,4	$l_p = l$	600	0,686	411		$\gg R_u$	14
6					$l_p = l/2$	300	1,37	$< R_u$				
7	12		31,1	2,6	$l_p = l$	600	1,08	R_u	373			
8	11,6		31,5	2,21			1,00	14,07	365			
9	8		38	4,5	$l_p = l/3$	200	1,18	235	$< R_u$			
10	7,5		39,3	5,2			1,00	200	$= R_u$	295		
11	14	38,2	2,73	$l_p = l$			800	0,898	718	$> R_u$	14	
12	16	35,8			1,251	$< R_u$						
13	14,8	37,2	2,51	$l_p = l/2$	400	1,03	R_u	550				
14	12	41,4	3,43			1,21	487	$< R_u$	497			
15	11,2	42,9	3,8			1,02	409	R_u	480			
16	1000	16	43,3	2,7	$l_p = l$	1000	0,828	828	$> R_u$	15		
17		18	40,8	2,26			1,11		1028		$< R_u$	734
18		17,4	41,5	2,4			1,02		14,7		722	
19		14	46,3	3,3	$l_p = l/2$	500	1,18	$< R_u$	648			
20		13,2	47,7	3,6			1,02	592	14,7		630	
21		10	54,9	5,5	$l_p = l/4$	250	1,02	255	14,6		549	
22	8	61,2	7,65	$l_p = l/6$	143	1,02	146	14,7	490			
Дальше изменение b, h, l_p теряет смысл												
							$M \ll 1$					
24	1200	18	49	2,33	$l_p = l$	1200	0,771	925	$\gg R_u$	15		
25		20	46,5	2,32			1,00		R_u		930	
26		14	55,6	4	$l_p = l/3$	400	1,23	433	$< R_u$		778	
27		12	60	5	$l_p = l/4$	300	1,12	336	$< R_u$		720	
28		11,5	61,4	5,3			1,00	14,95	706			
29		10	65,6	6,6	$l_p = l/6$	200	1,06	213	$= 14,2$		656	
30	1500	20	57,7	2,9	$l_p = l$	1500	0,647	970	$\gg R_u$	15		
31		16	64,9	4,1	$l_p = l/3$	500	1,104	500	$< R_u$		1038	
32		15,4	65,7	4,3			1,01	513	R_u		1011	
33		14	69,3	5	$l_p = l/5$	300	1,32	396	$\ll R_u$		970	
34		12	74,9	6,2	$l_p = l/6$	250	1,07	269	$< R_u$		898	
35		11,7	75,5	6,45			1,01	253	$= R_u$		883	

Сохраняем $l_p = l$ и принимаем новое сечение (строка 18), $M > 1$, поперечное сечение балки недонапряженное (графа 10). Такое поперечное сечение при $M = 1$ не требует раскрепления сжатой кромки $l_p > l$ (графа 9). Разница между σ и R_u указывает, что не раскрепляя сжатую кромку можно изменить размеры b и h , увеличив соотношение h/b (строка 19). Напряжение σ очень близкое к расчетному сопротивлению

(графы 10 и 11) и площадь поперечного сечения уменьшается (графа 12).

Эффективность поперечного сечения балки возрастает с увеличением соотношения h/b .

Увеличиваем h/b (строка 20) с раскреплением сжатой кромки в середине пролета (графа 6). Получаем «запас устойчивости» (графа 10). Соотношение h/b можно увеличить.

Принимаем h/b новое (строка 21): M близ-

кое к единице и площадь поперечного сечения меньше, чем в предыдущем варианте. Можно изменить раскрепление сжатой кромки, уменьшая l_p . Это приводит к большему «запасу устойчивости» без изменения A , а материальные затраты на раскрепление возрастают.

Продолжаем увеличивать h/b (строчки 22 и 23) с изменением l_p . Все расчетные условия выполняются и рациональность поперечного сечения возрастает.

На первый взгляд, достигается рациональность поперечного сечения балки, но это так теоретически. Балка не абстрактный элемент в расчете устойчивости плоской формы изгиба. Нагрузку от балки надо передать на нижерасположенные конструкции здания или сооружения. Реакция от нагрузки воспринимается опорной площадкой, где древесина работает на смятие поперек волокон, чему она сопротивляется очень слабо. При маленькой ширине балки, в рассматриваемом варианте расчета $b = 10$ или 8 см, может оказаться технически невозможным или труднорешаемым место опирания балки. На ширину балки накладываются ограничения условия опирания на нее прогонов или плит крыши. При проектировании перекрытий, покрытий могут возникнуть ограничения на высоту балки из-за назначенной в проекте строительной высоты конструкции перекрытия, покрытия. Не исключено появление каких-либо других факторов проектирования, влияющих на размеры поперечного сечения несущих балок. Это вынудит принять фиксированное значение соотношения h/b и в зависимости от этого искать рациональное решение, варьируя вели-

чиной l_p . Например, компоновка многослойного пакета из целого числа досок изменяет высоту сечения, механическая обработка заготовки из клееной древесины уменьшает ширину сечения (соответственно принятые в расчете h и b). Обеспечение пространственной жесткости покрытия, перекрытия и здания, сооружения в целом предполагает размещение необходимых элементов, которые могут определить размер l_p . Подобные проектные и производственные факторы отражаются на комбинаторике параметров h , b и l_p в решении рационального поперечного сечения балок.

Из анализа вариантов комбинации величин h , b , h/b , l_p и A для разных пролетов установлено, что рациональное сечение следует искать в области $h = l/20$. Точное решение получим итерационным процессом при ограничениях: $R_u = 0,95R_u^\phi$ (R_u^ϕ – действительное расчетное сопротивление согласно нормам проектирования); $\frac{b}{2} ql/2 R_{см.90}^\phi$ ($R_{см.90}^\phi$ – действительное расчетное сопротивление смятию поперек волокон в опорных частях); $h = h_{стр}$ (и возможные другие ограничения) с соблюдением следующих рекомендаций относительно раскрепления сжатой кромки:

2	$\frac{h}{b}$	3	3	$\frac{h}{b}$	4	4	$\frac{h}{b}$	5	5	$\frac{h}{b}$	6
без раскрепления			в $\frac{1}{2}$ пролета			в $\frac{1}{3}$ пролета			в $\frac{1}{4}$ пролета		

Методологическое обеспечение подбора рационального поперечного сечения балок поддается формализации в автоматизированных расчетных комплексах.

[1] Инструкция по проектированию деревянных конструкций /Изд-во строит. литературы. – М.Л.: 1940. – 191 с.
 [2] Wood Handbook. Wood as an engineering material. By Forest Products Laboratory Forest Service. U.S. Department of Agriculture. 1974.
 [3] Справочник по проектированию деревянных конструкций (к СНиП II-25-80) /ЦНИИСК им. В.А. Кучеренно. – М.: СИ. – 1986. – 214 с.
 [4] Клименко В.З. Забезпечення плоскої форми деформування дерев'яних стиснуто-згинальних елементів //Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2012. № 3. – С. 34–38.

[5] Клименко В.З. Новий нормативний документ по проектуванню дерев'яних конструкцій //Промислове будівництво та інженерні споруди. № 1.– 2013. – С. 28–32
 [6] Коченов В.М. Расчет деревянных конструкций по расчетным предельным состояниям/ М.: ГСИ. 1955. – 46 С.
 [7] Клименко В.З. Модуль упругости древесины и коэффициент продольного изгиба в расчетах конструкций //Промислове будівництво та інженерні споруди. 2013, № 2. – С. 40–45.

Надійшла 15.04.2013 р. 