

Численные исследования деформативности дощатоклееной конструкции покрытия с учетом ортотропии фанерных обшивок

Н.В. Линьков, А.А. Клюкин, Е.А. Потапова, П.А. Дубко, М.С. Лапина

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация: В статье рассматривается численное моделирование клеефанерной панели покрытия на основе конечно-элементной модели. Моделирование обшивок панели выполнено с учетом ортотропии фанеры. При расчете деформативности плиты покрытия необходимо учесть уменьшение жесткости конструкции в процессе эксплуатации, путем введения понижающего коэффициента. Расчетное исследование деформативности конструкции покрытия позволило установить коэффициент использования жесткости сечения панели покрытия.

Ключевые слова: клеефанерная плита покрытия, дощатоклееный элемент, модуль упругости, объемный вес, коэффициент Пуассона, расчетный пролет, нормативная нагрузка, четырехузловой конечный элемент, момент инерции сечения.

Введение

Клеефанерные плиты покрытий являются несущими [1] элементами ограждающей части покрытий зданий и сооружений общественного, складского, сельскохозяйственного и спортивного назначения. Выполняются плиты покрытий в виде каркаса из системы ребер и обшивок. Система ребер состоит из продольных и поперечных элементов и выполняется цельнодеревянной или дощатоклееной. Обшивки бывают симметричные верхняя и нижняя, либо только верхняя и выполняются водостойкой фанеры. Соединение фанерных обшивок с деревянными ребрами осуществляется на водостойком синтетическом клею и является жестким. Опираемые панели на несущие дощатоклееные конструкции покрытия является шарнирным. Для обеспечения изоляционных параметров ограждающей конструкции – в ячейки, формируемые системой ребер, укладывается система утеплителя и пароизоляции, с учетом воздушного зазора для обеспечения проветривания от конденсационной влаги.

При оценке несущей способности [2] панели покрытия выполняют проверки устойчивости верхней сжатой обшивки, прочности нижней растянутой обшивки, а также скалывание по расчетной ширине клеевого шва [3]. При оценке жесткости панели выполняют проверку прогиба [4, 5] панели по пролетной части. Главной особенностью расчета панелей является использование приведенных геометрических характеристик, учет модулей упругости двух материалов – древесины и фанеры, а для расчетного прогиба – введение коэффициента 0,7 к жесткости панели $E_f I_{\text{привед}}$, что выполняет учет приращение прогибов [6] в панели с течением времени в процессе ее эксплуатации. Клеефанерная плита запроектирована с учетом всех конструктивных особенностей, таких как: взаимное расположение продольных и поперечных ребер. Жесткое крепление обшивки к ребрам, особенности узла сплачивания двух плит между собой, а так же типоразмер исследуемого элемента.

Цель данной работы – выполнить численные исследования влияния ползучести в клефанерной панели покрытия, за счет шагового уменьшения изгибной жесткости на деформативность конструкции панели.

Предметом исследования является условие деформативности панели покрытия, предъявляемое к изгибаемой составной конструкции [7], состоящей из нескольких материалов.

Описание расчетной модели клефанерной панели

Для достижения поставленной задачи в программном комплексе Лира САПР была выполнена модель клефанерной плиты покрытия с двумя обшивками. Моделирование выполнялось в пятом признаке схемы, который предполагает шесть степеней свободы в узле – перемещения вдоль осей X, Y, Z, повороты относительно U_x , U_y , U_z . Для моделирования каркаса панели использованы четырехузловые пластинчатые конечные элементы Тип 41.

Общие геометрические параметры модели плиты покрытия представлены в таблице 1.

Таблица 1

Общие геометрические параметры модели

Параметр	Обозначение	Величина	Ед. измерения
1	2	3	4
Пролет панели покрытия	$L_{пан}$	5980	мм
Ширина панели покрытия	$B_{пан}$	1490	мм
Высота панели покрытия	$H_{пан}$	164	мм

Шарнирное опирание клефанерной плиты покрытия на нижележащие несущие конструкции было замоделировано в виде связей в нижних узлах по широкой стороне панели по направлениям X , Y , Z . Использование программного комплекса позволило учесть поэтапное снижение жесткости от величины $E_{фI_{пр}}$ до $0,7E_{фI_{пр}}$. Жесткости, назначенные элементам схемы приведены в таблице 2.

Таблица 2

Жесткости элементов схемы

Параметр	Обозначение	Величина	Ед. измерения
Модуль упругости древесины	$E_{др}$	10000	МПа
Объемный вес древесины	$V_{др}$	5	кН/куб.м.
Модуль упругости фанеры вдоль волокон	$E_{ф}$	9000	МПа
	$0,9E_{ф}$	8100	МПа
	$0,8E_{ф}$	7200	МПа
	$0,7E_{ф}$	6300	МПа
Модуль упругости фанеры поперек волокон	$E_{ф}^{90}$	6000	МПа
	$0,9E_{ф}^{90}$	5400	МПа
	$0,8E_{ф}^{90}$	4800	МПа
	$0,7E_{ф}^{90}$	4200	Мпа
Объемный вес фанеры	$V_{ф}$	7	кН/куб.м.
Модуль сдвига фанеры	$G_{ф}$	750	МПа

С целью замоделировать работу панели покрытия под нагрузками было создано 3 загрузки [8], учитывающие основные постоянные и временные нагрузки – собственный вес элементов конструкций, нагрузка от кровельного материала, утеплителя и пароизоляции, снеговая нагрузка. Параметры заданных нагрузок представлены в таблице 3.

Таблица 3

Параметры заданных нагрузок

Наименование нагрузки	Нормативная нагрузка	Расчетная нагрузка	Ед. измерения
Собственный вес элементов конструкций	Приложен автоматически по назначенным жесткостям с коэффициентом надежности по материалу 1,1		
Кровельный материал, утеплитель и пароизоляция	0,19	0,23	кН/кв.м.
Снеговая нагрузка	1,5	2,1	кН/кв.м.

Дальнейший расчет будет вестись для панели покрытия по схеме однопролетной разрезной балки [9] и как для конечноэлементной модели с пошаговым уточнением понижающего коэффициента к жесткости конструкции. Результаты будут анализироваться и сравниваться.

Результаты расчета

Расчет панели покрытия по длинной стороне как однопролетной разрезной балки предполагает возникновение максимальных изгибающего момента и прогиба в середине пролета, а также наибольшей поперечной силы на опорах конструкции. Вычисление расчетного прогиба, предельно-допустимого прогиба, сравнение полученных величин и вывод о несущей способности по второй группе предельных состояний, коэффициент использования жесткости представлены в таблице 4.

Таблица 4

Вычисление прогиба панели покрытия

Параметр	Обозначение	Формула	Значение	Ед.изм.
1	2	3	4	5
Прогиб расчетный	$f_{расч}$	$(5*q_n*L_p^4)/(384*E_f*I_{пр})$	12,8	мм
Прогиб предельно-допустимый	f_{ult}	$(1/250)*L$	23,6	мм
Выполнение условия по II группе предельных состояний		$f_{расч} \leq f_{ult}$	$12,8 < 23,6$	мм
Коэффициент использования жесткости	K_{EI}	$f_{расч} / f_{ult}$	0,54	-

Расчет панели покрытия в программном комплексе позволил проследить динамику увеличения прогиба конструкции при уменьшении жесткости. Деформированная схема [10] показывает наибольший прогиб конструкции также имеет в середине пролета, мозаика вертикальных перемещений и величины расчетных прогибов представлены на рисунке 1 и в таблице 5.

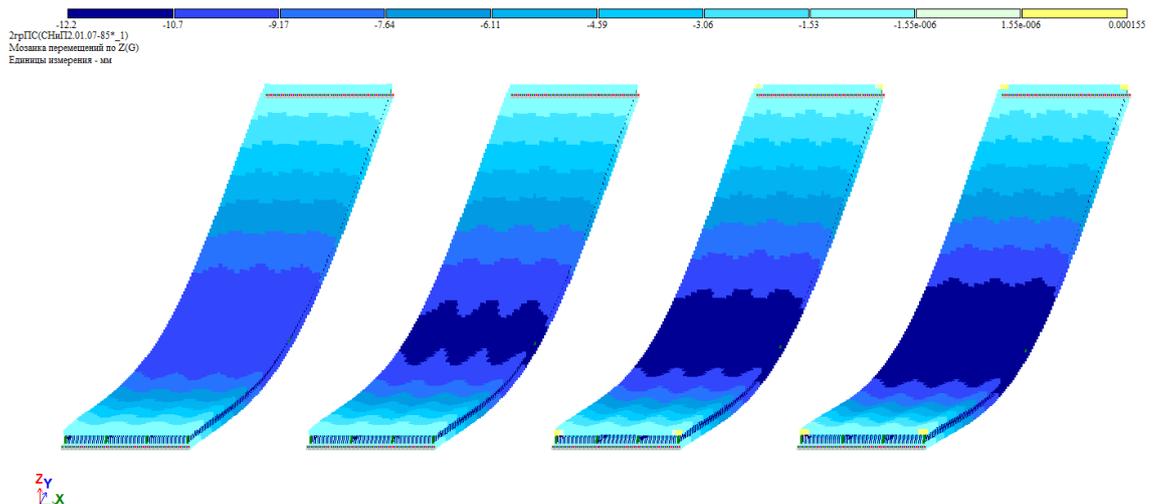


Рис.1. Вертикальные деформации расчетной модели

Следует отметить, что расчет произведен с учетом ортотропии пластин, моделирующих фанерные обшивки панели, что призвано повысить точность расчетов.

Таблица 5

Вычисление прогиба панели покрытия

Параметр	Обозначение	Модуль упругости	Значение	Ед.изм.
1	2	3	4	5
Прогиб расчетный	$f_{расч}^{мод}$	$E_{\phi} - E_{\phi}^{90}$	10,4	мм
		$0,9(E_{\phi} - E_{\phi}^{90})$	10,9	мм
		$0,8(E_{\phi} - E_{\phi}^{90})$	11,4	мм
		$0,7(E_{\phi} - E_{\phi}^{90})$	11,9	мм
Прогиб предельно-допустимый	f_{ult}	$(1/250)*L$	23,6	мм
Выполнение условия по II группе предельных состояний		$f_{расч}^{мод} \leq f_{ult}$	$10,4 < 23,6$	мм
			$10,9 < 23,6$	мм
			$11,4 < 23,6$	мм
			$11,9 < 23,6$	мм

Полученные значения вертикальных деформаций лежат в пределах допустимых значений. Сравнение коэффициентов использования жесткости конструкции панели по результатам расчета представлен в таблице 6.

Таблица 6

Коэффициенты использования жесткости

Параметр	Обозначение	Формула	Значение	Ед.изм.
1	2	3	4	5
Коэффициент использования жесткости	K_{EI}	$f_{расч} / f_{ult}$	0,54	-
		$f_{расч}^{мод} / f_{ult}$	0,5	-

Сравнительный анализ полученных значений вертикальных перемещений показал, что как для случая рассмотрения панели покрытия как

однопролетной разрезной балки, так и для конечно-элементной модели выполненной в программном комплексе Лира-САПР, вертикальные деформации, вычисленные от нормативных значений постоянных и временных снеговых нагрузок, не превышают предельно-допустимого значения, деформированная схема соответствует реальной работе конструкции под вертикальными нагрузками. При этом коэффициент использования жесткости по результатам расчетов составил $K_{EI}=0,5$.

Выводы

1. В программном комплексе Лира-САПР выполнена расчетная модель клефанерной панели покрытия.
 2. При моделировании произведено постепенное уменьшение изгибной жесткости конструкции за счет уточнения величин модулей упругости фанеры обшивок вдоль и поперек волокон.
 3. Получены значения максимальных значений вертикальных перемещений модели конструкции. Вертикальные деформации принимают значения от 10,4 мм до 11,9 мм.
 4. Выполнен расчет деформативности панели по разрезной схеме. Значения вертикальных деформаций составили 12,8 мм.
 5. Выполнен расчет предельно-допустимого значения прогиба панели. Значения вертикальных деформаций во всех расчетных случаях не превышают допустимого значения.
 6. Сравнение полученных значений K_{EI} показывает, что моделирование ортотропии фанерных обшивок панели покрытия, позволило уточнить запас жесткости на 8%.
 7. Запас жесткости позволяет при проектировании оптимизировать сечения конструкций, что приводит к экономии использования материала.
-

Литература

1. Серов Е.Н., Санников Ю.Д., Серов А.Е. Проектирование деревянных конструкций. М.: АСВ, 2016. 534 с.
 2. Арленинов Д.К., Беккер Д.А. Влияние уровня напряжений на ползучесть древесины при изгибе. Известия вузов. Лесной журнал. 2015. № 6. С. 128–137.
 3. Walford G. Bryan. Tests on nailed and glued layered timber cylindrical shells. ASCE J Struct Div. Vol. 106. 1980. pp. 247-263.
 4. Stern E. George. Nailed Flitch beams and griders providing opportunities in wood construction. // Virginia Polytechnic Institute & State University Department. VA, USA. 1982. pp. 55-64.
 5. Yinlan Shen, Schneider Johannes, Stiemer Siegfried F., Xueyong Ren Failure Modes and Mechanical Properties of Bracket Anchor Connections for Cross-Laminated-Timber. MATEC Web of Conferences 275. 2019. 1-7 pp.
 6. WCTE 2016 – Rothoblaas Research Project Partner, Research outcomes, Vienna, Austria, August 2016. 72 pp.
 7. Шогенов С.Х., Балов А.А., Афшагов Б.З. Новые конструкции универсальных панелей зданий // Инженерный вестник Дона, 2016, №2. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_18_shogenov_balov.pdf_fb3a2e9b32.pdf
 8. Василькин А.А., Рахронов Э.К. Системотехника оптимального проектирования элементов строительных конструкций. Инженерный вестник Дона. 2013, №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2203
 9. Стяпин Р.А. Унификация изгибаемых клееных деревянных конструкций по принципу подобия. Инженерный вестник Дона. 2013. №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1608
 10. Тухфатуллин Б.А., Путеева Л.Е., Подшивалов И.И. Расчёт деревянной рамы с использованием конечного элемента смешанного метода.
-



Информационно-вычислительные технологии и их приложения. Пенза. РИО ПГАУ. 2018. С. 109–113.

References

1. Serov E.N., Sannikov Yu.D., Serov A.E. Proektirovanie derevyannykh konstrukcij. [Design of wooden structures]. 2016. 534 p.
2. Arleninov D.K., Bekker D.A. Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal. 2015. № 6. pp. 128–137.
3. Walford G. Bryan. Tests on nailed and glued layered timber cylindrical shells. ASCE J Struct Div. Vol. 106. 1980. pp. 247-263.
4. Stern E. George. Virginia Polytechnic Institute & State University Department. VA, USA. 1982. pp. 55-64.
5. Yinlan Shen, Schneider Johannes, Stierner Siegfried F., Xueyong Ren Failure Modes and Mechanical Properties of Bracket Anchor Connections for Cross-Laminated-Timber. MATEC Web of Conferences 275. 2019. 1-7 pp.
6. WCTE 2016 – Rothoblaas Research Project Partner, Research outcomes, Vienna, Austria, August 2016. 72 pp.
7. Shogenov S.H., Balov A.A., Afashagov B.Z. Inzhenernyy vestnik Dona, 2016, №2. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_18_shogenov_balov.pdf_fb3a2e9b32.pdf
8. Vasil'kin A.A., Rakhmonov E.K. Inzhenernyy vestnik Dona. 2013, №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2203
9. Styapin R.A. Inzhenernyy vestnik Dona. 2013. №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1608
10. Tuhfatullin B.A., Puteeva L.E., Podshivalov I.I. Informatsionnovychislitel'nyye tekhnologii i ikh prilozheniya. 2018. pp. 109–113.

Дата поступления: 19.12.2025

Дата публикации: 28.02.2026