

ПРОЧНОСТЬ И ЖЕСТКОСТЬ СТЕНОВЫХ ПАНЕЛЕЙ НА ДЕРЕВЯННОМ КАРКАСЕ

Черных А. Г.¹, Черных А. С.², Коваль П. С.¹, Григорьев К. С.¹

¹ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Россия (190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4)

²ООО «ДСК «Славянский», Санкт-Петербург, Россия (196608, г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, ул. Автомобильная, д. 3, лит. Б)

Статья посвящена комплексным исследованиям прочности и жесткости стеновых панелей на деревянном каркасе с обшивками из цементно-стружечных плит при воздействии положительного и отрицательного ветрового давления. Проведены лабораторные испытания несущей способности металлических скоб, применяемых для крепления обшивок к деревянному каркасу.

С помощью конечно-элементного моделирования конструкции определены нагрузки на элементы соединения. Установлен рациональный шаг установки скоб. Приведены коэффициенты для расчета стеновых панелей с учетом податливости соединения деревянного каркаса и обшивок скобами. Для анализа возникающих в каркасе и обшивках напряжений и сравнения с результатами эксперимента разработана конечно-элементная модель панели, полностью имитирующая экспериментальные исследования. Это позволило сделать вывод о возможности расчета панелей без проведения экспериментов.

Ключевые слова: стеновая панель, деревянный каркас, прочность, жесткость, ветровая нагрузка.

STRENGTH AND STIFFNESS OF WALL PANELS ON A TIMBER FRAME

Chernykh A. G.¹, Chernykh A. S.², Koval P. S.¹, Grigorjev K. S.¹

¹Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPSUACE), St. Petersburg, Russia (190005, St. Petersburg, 2-nd Krasnoarmeiskaya St. 4)

²“DSK “Slavyanskiy” Co Ltd., St. Petersburg, Russia (196608, St. Petersburg, Pushkin, Avtomobilnaya St. 3B)

This article is devoted to integrated study of strength and stiffness of wall panels on a timber frame with sheeting, made of cement bonded particle boards, under the influence of positive and negative wind load. There are made the preproduction tests of load-carrying ability of metal staples used to fasten sheeting to a timber frame.

By the construction FE modeling, the loads of joint members are defined. The rational space of staples placing is established. There are given the coefficients for calculation of wall panels, taking into account joint compliance of timber frame and sheeting by means of staples. For the analysis of appearing tensions and the comparison with the results of experiment, the finite element model of the panel has been designed, which completely simulates the pilot studies. It allows drawing a conclusion about the possibility of calculation of panels without carrying out experiments.

Key words: wall panel, timber frame, strength, stiffness, wind load.

Введение

В последние годы за рубежом в строительстве жилых и общественных зданий широко используется комбинированная технология строительства (КТС), которая заключается в сочетании несущего железобетонного каркаса и ограждающих стеновых панелей на деревянном каркасе. Началось освоение КТС и в нашей стране (жилой комплекс «Славянка» в г. Пушкин, СПб). В данном случае стеновые панели на деревянном каркасе устанавливались на железобетонные перекрытия здания и входили в состав многослойной ограждающей конструкции, включающей наружное утепление и навесную фасадную систему с воздушным зазором и облицовкой из керамогранитных плит [6]. В качестве обшивок панели были применены как наиболее рациональный вариант с точки зрения

эксплуатационных свойств, технологичности и экономичности при изготовлении, цементно-стружечные плиты (ЦСП) [5], которые крепились к каркасу при помощи металлических оцинкованных скоб.

Поскольку стеновая панель на деревянном каркасе при КТС не является несущей, то для оценки ее жесткости достаточно экспериментально определить прогиб в направлении, перпендикулярном фронтальной плоскости панели, от ветровой нагрузки и напряжения, возникающие в элементах каркаса и обшивках. Соединение при помощи металлических скоб обладает некоторой величиной податливости, что сказывается на общей жесткости панели. Соответственно, расчет несущей способности составного изгибаемого элемента – стеновой панели на деревянном каркасе – следует вести с введением в него коэффициентов податливости, которые определяются в каждом случае в зависимости от параметров панели.

Целью данной работы явилось исследование возможности применения метода конечных элементов для расчета несущей способности стеновых панелей на деревянном каркасе по I и II группам предельных состояний с учетом совместной работы каркаса и обшивки на податливых связях. Для этого возникла необходимость проведения комплекса исследований, включающего экспериментальное определение несущей способности соединения при помощи металлических скоб, расчет рационального шага расстановки скоб (при заданной нагрузке), экспериментальное определение прогиба полномасштабной модели стеновой панели от различных знакопеременных ветровых нагрузок, расчет коэффициентов податливости соединения листов обшивки и элементов каркаса и на заключительном этапе – имитационное моделирование процесса ветрового воздействия при помощи метода конечных элементов в проектно-вычислительном ПК SCAD.

Вначале были определены ветровые нагрузки согласно [3]. Рассматривался несколько упрощенный случай прямоугольного в плане здания с протяженностью фасада, большей, чем максимальная высота. При этом были выбраны два уровня наибольшей допустимой высоты здания – 28 м (II степень огнестойкости, класс конструктивной пожарной опасности С1) и 75 м (I степень огнестойкости, класс конструктивной пожарной опасности С1). Т.к. для приторцово́й зоны фасада и для его центральной части значения ветровых нагрузок отличны друг от друга, то получилось четыре расчетных случая (два уровня высоты и две зоны расположения панели на фасаде). Расчетные ветровые нагрузки, воздействующие на стеновую панель, приведены в табл. 1 (II ветровой район, тип местности В, г. Санкт-Петербург).

Таблица 1. Ветровые давления, действующие на стеновую панель

Ветровое давление	Высота здания, зона расположения панели на фасаде
-------------------	---

	Отметка +28,0 м		Отметка +75,0 м	
	Центральная	Приторцовая	Центральная	Приторцовая
Положительное w_+^p , кПа	0,74	0,74	0,97	0,97
Отрицательное w_-^p , кПа	- 0,69	- 1,26	- 0,91	- 1,67

Для определения несущей способности соединения деревянных элементов каркаса и обшивок панели из ЦСП при помощи металлических скоб были проведены испытания с последующей обработкой данных согласно [7] и [8]. Полученное значение несущей способности одной скобы – 1,03 кН.



Рис. 1. Определение несущей способности соединения скобой;
слева – на сдвиг, справа – на выдергивание

Затем, для заданных ветровых нагрузок (табл. 1) был определен рациональный шаг расстановки крепежных скоб. Для этого при помощи метода конечных элементов в ПК SCAD была определены усилия на погонный метр шва соединения обшивки и каркаса при ветровых воздействиях. Для полной передачи усилий упругие связи заменялись жесткими, расставленными с шагом 0,1 м. Усредненное значение эквивалентного линейно-распределенного усилия составило 4,06 кН/м, а усилие вырыва скоб – 0,45 кН/м. Таким образом, на погонный метр вертикальной стойки каркаса требуется 3,9 скоб для крепления листов обшивки из ЦСП. Однако ввиду неравномерности распределения напряжений и для обеспечения запаса прочности, следует принимать 5 скоб на погонный метр, т.е. рациональным шагом расстановки скоб при исследованных нагрузках является 0,2 м.

После определения рационального шага расстановки скоб была создана полномасштабная модель стеновой панели, и проведены ее испытания на прогиб при воздействии различных знакопеременных ветровых нагрузок (рис. 2). При этом условия закрепления панели полностью соответствовали существующим конструктивным решениям. Полученные средние прогибы центра тяжести панели по экспериментальным данным приведены в табл. 2.

Таблица 2. Экспериментальные прогибы центра тяжести панели

Параметр	Ветровое давление, кПа					
	Отрицательное w_-^P				Положительное w_+^P	
	- 0,69	- 0,91	- 1,26	- 1,67	0,74	0,97
Прогиб f , мм	-1,839	-2,457	-3,353	-4,366	2,130	2,559



Рис. 2. Экспериментальные исследования полномасштабной модели стеновой панели.

В зависимости от геометрических и физических параметров стеновой панели были определены и введены в расчет прочности и жесткости коэффициенты податливости соединения каркаса и обшивки: $k_{ж}$ к моменту инерции для расчёта прогиба и коэффициент k_w к моменту сопротивления для расчета на прочность [1].

$$k_{ж} = \frac{1 + B \frac{J_c}{J_0}}{1 + B}; \quad (1)$$

$$k_w = \frac{1 + B \frac{J_c}{J_0}}{1 + B \frac{J_c W_0}{J_0 W_c}}; \quad (2)$$

$$B = \frac{\pi^2 S n_{ш} E \delta_c}{e \cdot l \cdot n_c T_c}; \quad (3)$$

Где:

J_0 – момент инерции центрального I-образного сечения панели; J_c – момент инерции отдельных слоев, равный сумме моментов инерции слоев обшивки и каркаса; S –

статический момент одного листа обшивки; $n_{ш}$ – число швов в составном элементе; E – модуль упругости при изгибе, принимаем с учетом длительной работы материалов; δ_c – деформации соединений при полном их использовании (табл. 18, [3]); e – расстояние между нейтральными осями листов обшивки; l – расчетный пролет панели; n_c – число связей в одном шве на весь пролет; T_e – расчетная несущая способность одной связи.

Указанные коэффициенты в данном случае определены применительно только к расчету панели на воздействие горизонтальной (ветровой) нагрузки, т.к. при работе из плоскости панель обладает меньшей жесткостью. По расчетам получены следующие величины коэффициентов: $k_{ж}=0,22$ и $k_w=0,25$. Расчетные напряжения и прогибы панелей с учетом податливости связей каркаса и обшивок приведены в табл. 3.

Таблица 3. Расчетные прогибы и напряжения в панели

Параметр	Ветровое давление, кПа					
	Отрицательное w_-^p				Положительное w_+^p	
	- 0,69	- 0,91	- 1,26	- 1,67	0,74	0,97
$\sigma, \frac{kH}{cm^2}$	0,124	0,160	0,218	0,286	0,134	0,170
Напряжение						
Прогиб f , мм	- 2,10	- 2,77	- 3,84	- 5,09	2,29	2,96

Оценка несущей способности панели по I группе предельных состояний производилась в результате анализа возникающих в ней напряжений. Для их определения в ПК SCAD была задана модель панели в конечных элементах (рис. 3), на которой была выполнена имитация ветровых воздействий, различных по знаку и величине (табл. 1).

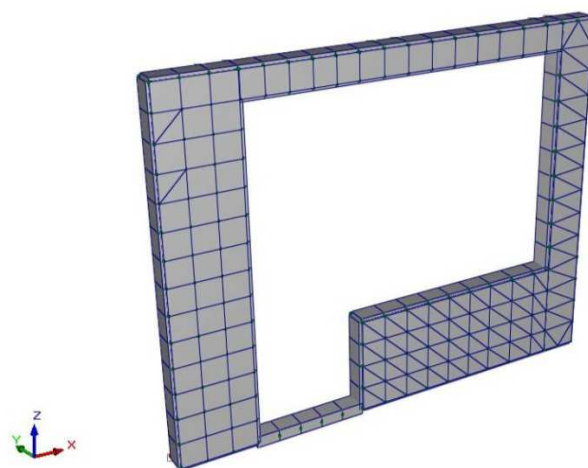


Рис. 3. Общий вид конечно-элементной модели стеновой панели

Деревянные элементы каркаса моделировались с помощью пластинчатых конечных элементов с ортотропными характеристиками жесткости [2]. Применение конечных элементов такого типа позволяет учесть анизотропию древесины. Коэффициенты Пуассона, модули упругости и модуль сдвига древесины задавались в соответствии с [4]. Листы обшивки панели из ЦСП моделировались с помощью пластинчатых конечных элементов с изотропными характеристиками жесткости (коэффициент Пуассона – 0,2, модуль упругости – 3000 МПа). Скобы, скрепляющие листы обшивки и каркас, были выполнены в виде конечных элементов, моделирующих связи конечной жесткости, устанавливаемых между двумя узлами и обеспечивающих взаимную линейную или угловую податливость узлов [2]. При этом учитывалась податливость соединения скобами в соответствии с выведенными ранее ее показателями. Закрепление панели было условно принято как шарнирно-неподвижное в трех точках верхней и нижней частей конструкции.

К расчетной схеме были приложены: собственный вес элементов каркаса и обшивки, пиковая ветровая нагрузка, пульсационное ветровое нагружение. При выполнении расчета соблюдались требования и рекомендации [3] и [4]. Динамический расчет системы был выполнен с использованием разложения по формам собственных колебаний (не более 6, согласно [3] для пульсации ветрового потока). Давление ветра на стеновую панель рассматривалось как сумма статической и пульсационной составляющих ветровой нагрузки. Усилия в элементах системы и перемещения ее точек находились отдельно от статической составляющей ветровой нагрузки и от инерционных сил, соответствующих каждой форме собственных колебаний. При этом считалось, что колебания совершаются вокруг смещенного состояния равновесия, соответствующего статической (средней) компоненте нагружения.

Результаты конечно-элементного моделирования (табл. 4) показали, что напряжения в элементах каркаса не превышают допустимых при наиболее невыгодном сочетании усилий. Деформации не превысили предельно допустимых значений [4]. Следовательно, прочность стеновой панели обеспечена при данном шаге расстановки скоб и воздействии данных нагрузок.

Таблица 4. Прогибы и напряжения в элементах панели, согласно КЭ-моделирования

Параметр	Ветровое давление, кПа					
	Отрицательно w_-^p				Положительное w_+^p	
	- 0,69	- 0,91	- 1,26	- 1,67	0,74	0,97

Напряжение, МПа	Обшивка	0,11	0,15	0,16	0,27	0,12	0,15
	Каркас	1,47	1,95	2,71	3,6	1,58	2,08
Прогиб f , мм		-1,883	-2,483	-3,438	-4,557	2,188	2,647

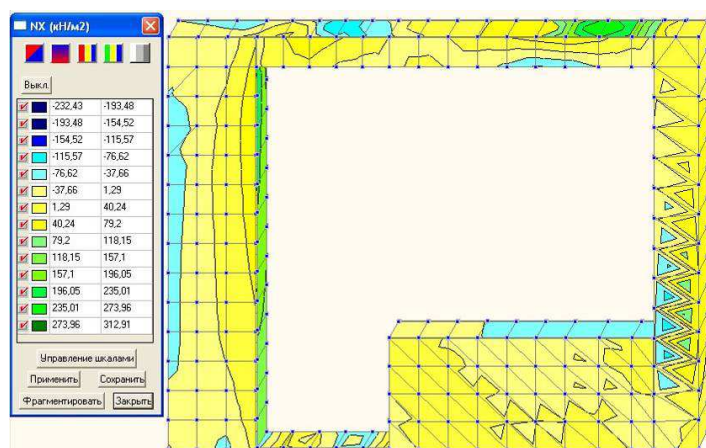


Рис. 4. Результаты КЭ-моделирования: нормальные напряжения N_x , кН/м²

Выводы:

- определён рациональный шаг установки крепежных скоб, равный 0,2 м при воздействии ветровых давлений на высоте 28 и 75 м (II ветровой район, тип местности В), при котором обеспечиваются прочность и жесткость панели;
- для учета податливости соединения каркаса и листов ЦСП и повышения точности расчетов определены коэффициент к моменту инерции $-k_{ж}=0,22$ (коэффициент жесткости составного элемента на податливых соединениях) и коэффициент к моменту сопротивления $-k_w=0,25$;
- компьютерное моделирование сопротивления конструкции воздействию ветровой нагрузки показало хорошую сходимость данных по прогибам с экспериментом – 2–4 % (табл. 2, 4), что позволяет рекомендовать использование при проектировании стеновых панелей на деревянном каркасе с обшивками из листов ЦСП метода конечных элементов для определения напряжений и деформаций в конструкции, а следовательно, ее прочности и жесткости.

Список литературы

1. Линьков И. М. Исследование стеновых панелей с деревянным каркасом и асбестоцементной обшивкой. В сб. ЦНИИСК «Стеновые панели на основе древесных материалов и асбестоцемента». Выпуск 26. – М.: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1963. – С. 16-19.

2. Перельмутер А. В., Сливкер В. И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. – 4-е изд., перераб. – М.: Изд-во СКАД СОФТ, 2011. – 736 с.
3. СП 20.13330.2011. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* «Нагрузки и воздействия».
4. СП 64.13330.2011. Актуализированная редакция СНиП II-25-80 «Деревянные конструкции».
5. Черных А. С. Рациональный выбор листового материала для изготовления стеновых панелей на деревянном каркасе для зданий из железобетона // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – №2. – С. 86-90.
6. Черных А. С., Черных А. Г. Стеновые панели на деревянном каркасе в составе ограждающих конструкций многоэтажных жилых зданий из железобетона // Жилищное строительство. – 2012. – №4. – С. 1-4.
7. EN 1381:1999 Timberstructures. Test methods. Load bearing stapled joints.
8. EN 1383:1999 Timber structures. Test methods. Pull-through resistance of timber fasteners.

Рецензенты:

Серов Е. Н., д.т.н., профессор кафедры конструкций из дерева и пластмасс ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», г. Санкт-Петербург.

Лабудин Б. В., д.т.н., профессор кафедры инженерных конструкций и архитектуры ИСиА ФГАОУ ВПО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова», г. Архангельск.