

УДК 692.23

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
НЕСУЩИХ КРОНШТЕЙНОВ ФАСАДНЫХ СИСТЕМ
СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ ТЕКСТИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**EXPERIMENTAL AND THEORETICAL ANALYSIS
OF THE STRESS-STRAIN STATE (SSS) OF THE BEARING BRACKETS
IN THE CURTAIN WALL SYSTEMS WITH AN AIR GAP
IN BUILDING PROJECTS OF THE TEXTILE INDUSTRY**

Л.В. ЕНДЖИЕВСКИЙ, А.В. ФРОЛОВСКАЯ, Ю.М. ПЕТРОВА
L.V. ENDZHIEVSKIY, A.V. FROLOVSKAYA, YU.M. PETROVA

(Сибирский федеральный университет)
(Siberian Federal University)

E-mail: tereshkova81@mail.ru, yevtifeva@mail.ru

В работе реализован комплексный подход к проблеме исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов каркаса – кронштейнов – фасадных систем с вентилируемым воздушным зазором строительных объектов текстильной промышленности, включающий математическое моделирование, экспериментальные исследования в лабораторных условиях на натурных моделях, численные исследования и сопоставительный анализ результатов. Выявлены особенности развития механизмов деформаций кронштейнов, расположенных вертикально и горизонтально относительно плоскости стены, при учете сдвига, кручения и других факторов. Приведен вариант усовершенствования опорной части кронштейна для горизонтально расположенного кронштейна.

The authors have realized an integrated approach to the problem of stress-strain state (SSS) investigating in frame elements - curtain wall systems with a ventilated air gap in building projects of the textile industry which includes mathematical simulation, experimental researches in the laboratory conditions on the full-scale models, numerical researches and comparative analysis of the results. We reveal the features of brackets deformation mechanisms arranged vertically and horizontally relative to the plane of the wall taking into account the shear, torsion and other factors. An option, to improve the base of the brackets to horizontal brackets, has been given.

Ключевые слова: фасадная система, несущие элементы, кронштейн, напряженно-деформированное состояние, анализ, учет сдвига, кручение.

Keywords: curtain wall system, bearing elements, bracket, stress-strain state, analysis, taking into account the shear, torsion.

Российская текстильная промышленность должна составить конкуренцию зарубежным компаниям, считает Владимир Путин. В своем выступлении на Петербургском международном экономическом форуме Президент РФ подчеркнул, что за счет модернизации промышленности и строительства новых предприятий в России возможно существенно сократить импорт по многим позициям и вернуть собственный рынок национальным производителям [1].

По Стратегии развития легкой промышленности [2] доля российской продукции на российском розничном рынке к 2020 г. должна увеличиться с текущих 25 до 50%. Многие предприятия текстильной промышленности в данный момент требуют капитального ремонта.

С выходом в свет Федеральной целевой программы "Энергосбережение России" и Федерального закона № 261-ФЗ "Об энергосбережении..." (ред. от 03.07.2016 г.) изменились нормативные требования к энергозатратам в стадии эксплуатации зданий и инженерных сооружений.

Навесная фасадная система с вентилируемым воздушным зазором (НФС), состоящая из несущих элементов (кронштейны, направляющие), теплоизоляционного слоя и облицовочного материала, в целом представляет энергосберегающую технологию. Эта технология, решая проблему энергосбережения здания, рождает новые проблемы, которые требуют ответа. Типичные ошибки, возникающие при работе НФС, отмечены в [3]. При разработке проектно-сметной документации (проектирование НФС) можно выделить: отсутствие единой методики расчета несущих и крепежных элементов и достоверных данных о действительной работе конструкции и отдельных ее элементов; неверно приняты расчетные схемы несущих элементов (ошибки при назначении расчетной схемы кронштейна приводят к искажениям при определении значений внутренних сил, действующих на анкер и материал основания, а также на недооценку прочности прочностных расчетов) и др.

В рамках настоящей работы авторами проведены экспериментальные и по раз-

личным методикам численные исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) несущих кронштейнов.

Проведен сопоставительный анализ двух типов L-образных кронштейнов толщиной 2 мм, применяемых в фасадных системах типа "Краспан", расположенных вертикально (вариант 1) и горизонтально (вариант 2) относительно плоскости стены. Материал – оцинкованная сталь (модуль упругости $E = 2,06 \cdot 10^5$ МПа). Геометрические параметры кронштейнов: вылет $l = 300$ мм; размеры поперечного сечения $t \times h = 2 \times 83$ мм. Предельный прогиб кронштейнов $[f] = \frac{l}{120}$.

В качестве исходных принята навесная фасадная система "Краспан" с креплением в межэтажное перекрытие с облицовкой стальными композитными панелями Краспан-Композит-ST толщиной 2 мм, весом 7,6 кг/м². Шаг кронштейнов: по вертикали (высота этажа) – 4,8 м, а по горизонтали – 0,4 м. Нормативное и расчетное значения вертикальной нагрузки от собственного веса навесной фасадной системы, действующие на кронштейн, соответственно равны 30 и 35 кг.

В результате экспериментальных исследований получено, что при одинаковой расчетной нагрузке (35 кг) процесс развития деформаций различен (рис. 1 – картина развития деформаций кронштейнов во время испытаний: а) – кронштейны, расположенные вертикально относительно плоскости стены; б) – потеря несущей способности кронштейнов, расположенных горизонтально относительно плоскости стены; в) – график зависимости "нагрузка-прогиб" кронштейнов): кронштейны, расположенные вертикально относительно плоскости стены (рис. 1-а) имеют запас прочности, а при горизонтальном расположении – потеря несущей способности наступает до расчетного значения нагрузки (рис. 1-б).

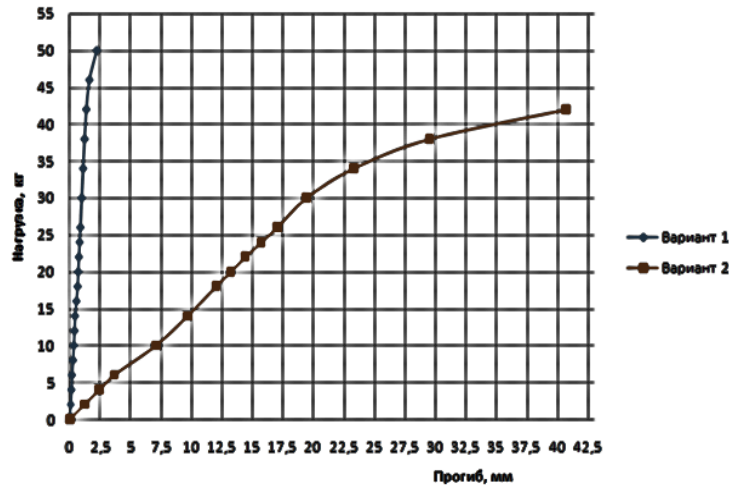
Проведены численные исследования с использованием программных комплексов SCAD и Lira по континуальной схеме. Кронштейн представляли как пластинчатую систему с размерами конечных элементов 2×2 мм и как стержневую модель в классической постановке.



а)



б)



в)

Рис. 1

Аналитический расчет выполняли методом начальных параметров с использованием стержневой модели в классической постановке. Численные исследования показали, что практическая точность достигается при $l_{кэ} < l/4$. В табл. 1 приведены решения при $l_{кэ} = l/10$ соответственно для кронштейнов, расположенных в вертикальном (1) и горизонтальном (2) положениях в

упругой стадии работы стали, и их сопоставление с экспериментальными данными. Распределение деформаций (прогибов) по оси z при P=30 кг в кронштейнах при расчетной схеме как жесткозашемленных элементов (без учета сгиба) при их расположении относительно плоскости стены а) – вертикальном, б) – горизонтальном представлены на рис. 2.

Т а б л и ц а 1

№ варианта	Нагрузка P, кг	$U_{эксп}$, мм	Аналитический расчет u_{1z} , мм	$\frac{U_{эксп} - u_{1z}}{0,01U_{эксп}}$, %	$U_{МКЭ}$ (мм) без учета сгиба	$\frac{U_{МКЭ} - u_{1z}}{0,01U_{МКЭ}}$, %
1	20	0,674	0,0749	88,9	0,07647	2,05
	25	0,813	0,0936	88,5	0,09559	2,08
	30	0,954	0,1123	88,2	0,1147	2,09
2	20	13,2	1,125	91,5	30,10065	96,26
	25	16,36	1,4063	91,4	37,62581	96,26
	30	19,4	1,6875	91,3	45,15097	96,26

Ввиду существенного расхождения полученных результатов с экспериментом нами выполнены численные исследования стержневой модели с учетом сдвига [4].

Результаты этих расчетов и их сопоставление с экспериментальными данными приведены в табл. 2.

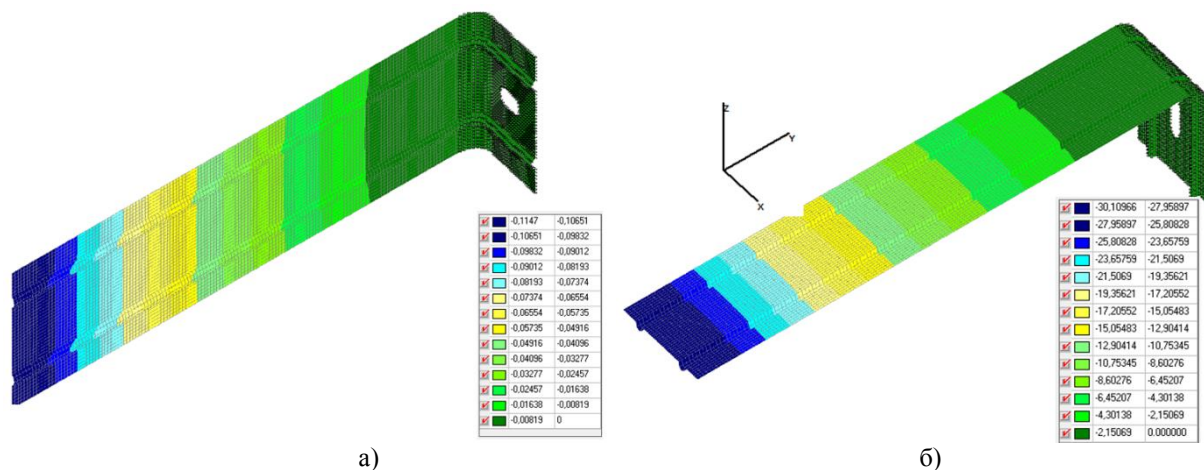


Рис. 2

Т а б л и ц а 2

№ варианта	Нагрузка Р, кг	$u_{\text{эксп}}$, мм	С учетом сдвига $u(x)$, мм	$\frac{u_{\text{эксп}} - u(x)}{0,01u_{\text{эксп}}}$, %	$u_{\text{МКЭ}}$ (мм) без учета сгиба	$\frac{u_{\text{МКЭ}} - u(x)}{0,01u_{\text{МКЭ}}}$, %
1	20	0,674	0,0764	88,66	0,07647	0,09
	25	0,813	0,0955	88,25	0,09559	0,09
	30	0,954	0,1146	87,99	0,1147	0,09
2	20	13,2	1,1889	90,99	30,10065	96,05
	25	16,36	1,4862	90,91	37,62581	96,05
	30	19,4	1,7834	90,81	45,15097	96,05

Из табл. 2 следует, что учет сдвига уменьшает расхождение с экспериментом, однако расхождение осталось большим.

Еще одним возможным вариантом численных исследований, по нашему мнению, может служить учет кручения.

Фактически из-за контакта со стеновым ограждением опорная часть находится в условиях стесненного кручения. Опорная часть работает на кручение с изгибом, а сам стержень – на изгиб с поворотом в двух плоскостях, как абсолютно жесткий стержень.

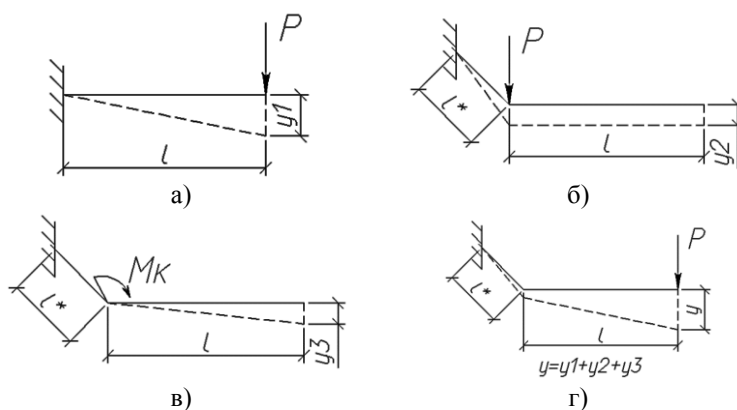


Рис. 3

Модель формирования прогиба кронштейна представлена на рис. 3 (а – расчетная схема для расчета прогиба u_1 ; б – для расчета прогиба u_2 ; в – для расчета прогиба

u_3 ; г – максимальный прогиб кронштейна с учетом кручения u_{max}).

$$u_{\text{max}} = u_1 + u_2 + u_3.$$

Здесь $y_1 = \frac{P \cdot \ell^3}{3EJ_x(z)}$ – прогиб как жесткозащемленного консольного стержня; $y_2 = \frac{P \cdot (\ell^*)^3}{3EJ_x(z)}$ – прогиб за счет изгибной дефор-

мации его опорной части; $y_3 = \ell \cdot \text{tg}\varphi$ – прогиб за счет кручения опорной части кронштейна.

Т а б л и ц а 3

№ варианта	Нагрузка P, кг	U _{эксп} , мм	С учетом кручения U _{max} , мм	$\frac{U_{\text{эксп}} - U_{\text{max}}}{0,01U_{\text{эксп}}}, \%$	УМКЭ (мм) без учета сгиба	$\frac{U_{\text{МКЭ}} - U_{\text{max}}}{0,01U_{\text{МКЭ}}}, \%$
1	20	0,674	0,0834	87,63	0,07647	8,3
	25	0,813	0,10428	87,17	0,09559	8,3
	30	0,954	0,12511	86,88	0,1147	8,3
2	20	13,2	15,8227	16,57	30,10065	47,4
	25	16,36	19,7784	17,28	37,62581	47,4
	30	19,4	23,7340	18,26	45,15097	47,4

Учет кручения существенно повлиял на результаты 2-го варианта (табл. 3).

Однако и аналитические решения по модели с учетом кручения, и по МКЭ расходятся с экспериментальными данными. Возможная причина – несовершенство принятой расчетной схемы.

Выполним численные исследования прогибов кронштейнов с учетом их опорной части (сгиба) и сопоставим полученные результаты с экспериментальными данными.

Существенное влияние учет сгиба оказал на вариант 1 (табл. 4). Во 2-м варианте привел к изменениям прогибов не более 10%.

Т а б л и ц а 4

№	Нагрузка P, кг	U _{эксп} , мм	УМКЭ (мм) без учета сгиба	$\frac{U_{\text{эксп}} - U_{\text{МКЭ}}}{0,01U_{\text{эксп}}}, \%$	УМКЭ * (мм) с учетом сгиба	$\frac{U_{\text{эксп}} - U_{\text{МКЭ}*}}{0,01U_{\text{эксп}}}, \%$
1	20	0,674	0,07647	88,65	0,66782	0,92
	25	0,813	0,09559	88,24	0,83477	-2,67
	30	0,954	0,1147	87,98	1,00173	-5,00

Мы объясняем это тем, что опорная часть не может свободно закручиваться, как это принято в стержневой модели ввиду ее одностороннего стеснения за счет контакта со стеновым ограждением. В дальнейших исследованиях нами рассмотрены приближенные расчетные схемы, соответствующие экспериментально наблюдаемым картинам изменения контактной зоны опорной части кронштейна со стеновым ограждением. Это говорит о необходимости рассмотрения задачи как конструктивно-нелинейной. Конструктивная нелинейность проявляется в форме изменения зоны контакта опорной части. Учет конструктивной нелинейности возможен: при стержневой схеме – за счет введения упругоподатливой связи с переменной характеристикой упругой податливости; при континуальной схеме – за счет пошагового изменения зоны контакта между опорной частью и стеновым ограждением.

ВЫВОДЫ

1. Выбор расчетной схемы кронштейна как самостоятельного элемента играет существенную роль в формировании и оценке его НДС.

2. Результаты экспериментально-теоретических исследований показывают, что кронштейн, расположенный горизонтально относительно плоскости стены (вариант 2), требует усиления опорной части. В качестве возможного конструктивного усовершенствования рекомендуется использовать поперечное ребро жесткости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стратегия развития легкой промышленности: Поручение Президента Российской Федерации от 3 июля 2008 года № Пр-1369 и поручение Правительства Российской Федерации от 15 июля 2008 года № ВП- П9-4244/Министерство промышленности и торговли Российской Федерации. – М., 2013.

2. Обшить Россию [Электронный ресурс] // ГАЗЕТА.ш, 2004. URL: <https://www.gazeta.ru/business/2014/06/09/6056873.shtml>.

3. *Енджиевский Л.В., Терешкова А.В.* Экспериментально-теоретический анализ деформирования несущих кронштейнов в фасадной системе с вентилируемым воздушным зазором // Журнал ТГАСУ. – 2007, № 1. С.110...117.

4. *Тесман Г.Н.* (ООО "ГенИнжПроект") Правила проектирования. Анализ ошибок фасадных систем // Современные строительные конструкции, Фасадные системы. – 2008, № 1(5). С. 50...53.

REFERENCES

1. Strategiya razvitiya legkoj promyshlennosti: Poruchenie Prezidenta Rossiyskoj Federatsii ot 3 iyulya 2008 goda № Pr-1369 i poruchenie Pravitel'stva Rossiyskoj Federatsii ot 15 iyulya 2008 goda № VP- P9-

4244//Ministerstvo promyshlennosti i trgovli Rossiyskoj Federatsii. – М.,2013.

2. Obshit' Rossiyu [Elektronnyy resurs] // GAZETA.sh, 2004. URL: <https://www.gazeta.ru/business/2014/06/09/6056873.shtml>.

3. *Endzhievskiy L.V., Tereshkova A.V.* Eksperimental'no-teoreticheskiy analiz deformirovaniya nesushchikh kronshteynov v fasadnoy sisteme s ventiliruemym vozdushnym zazorom // Zhurnal TGASU. – 2007, № 1. S.110...117.

4. *Tesman G.N.* (ООО "GenInzhProekt") Pravila proektirovaniya. Analiz oshibok fasadnykh sistem // Sovremennye stroitel'nye konstruksii, Fasadnye sistemy. – 2008, № 1(5). S. 50...53.

Рекомендована кафедрой строительных конструкций и управляемых систем. Поступила 10.11.16.